

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

IMPACTO RADIOLÓGICO DEVIDO AO TRANSPORTE DE
RADIOFÁRMACOS DO IPEN – CNEN/SP

DEMerval LEÔNIDAS RODRIGUES

Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau
de Doutor em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear- Aplicações.

Orientador:
Dr. Gian-Maria A. A. Sordi

São Paulo

2009

A meus pais e irmãos

A minha esposa Ângela, pelo seu amor, dedicação e incentivo

A minhas filhas Lívia e Sofia, luz eterna no meu viver

AGRADECIMENTOS

Ao amigo Professor Dr. Gian-Maria Agostino Ângelo Sordi, pelo incentivo, confiança e orientação na execução desta Tese.

À Professora Dra. Linda V. Caldas, pelas revisões, pelos ensinamentos, sugestões, estímulo e amizade demonstrada durante a realização deste trabalho.

Ao Bel. Jurandyr S. de Carvalho, pelo apoio e ajuda no levantamento de informações, pelas fotos e pela amizade dedicada durante a realização deste trabalho.

À Dra. Luzia Venturini, pela amizade e inestimável colaboração na modelagem matemática e na realização dos cálculos.

Ao amigo, “irmão”, Dr. Paulo Fernando Lavalle Heilbron Filho, pelas discussões, sugestões, estímulo e amizade demonstrada durante a elaboração desta tese.

Ao M. Sc. Matias Puga Sanches, pela amizade, incentivo e discussão dos dados levantados.

Às amigas Sra. Filomena de Fina Beraldo e Sra. Donata Zanin, pela amizade e ajuda na preparação dos exemplares e na formatação da Tese.

À Diretoria de Radiofarmácia pela oportunidade oferecida para a coleta de informações sobre o transporte de radiofármacos.

Aos amigos e colegas da Gerência de Radioproteção, que direta ou indiretamente colaboraram na realização deste trabalho.

IMPACTO RADIOLÓGICO DEVIDO AO TRANSPORTE DE RADIOFÁRMACOS DO IPEN – CNEN/SP

Demerval Leônidas Rodrigues

RESUMO

Quando um embalado é transportado, as pessoas que trabalham, residem ou circulam no itinerário percorrido pelo transporte de materiais radioativos são irradiadas, assim como aquelas pessoas que estão dentro dos veículos que viajam no mesmo sentido ou no sentido contrário. Desta forma, o trabalho proposto tem como principal objetivo estimar o impacto radiológico resultante do transporte de radiofármacos do IPEN - CNEN/SP até alguns destinos previamente definidos. Para isso, foram estimadas as doses nos indivíduos do público que estão nas ruas e nos veículos que trafegam próximos dos meios de transporte, ao longo do itinerário percorrido pelos embalados, durante a realização dos transportes dos radiofármacos. Foram estimadas as doses, também, para os trabalhadores, resultantes tanto da operação de condução do meio de transporte como das operações de carga e descarga dos embalados, já que estas tarefas são executadas pelo mesmo trabalhador.

RADIOLOGICAL IMPACT FROM THE TRANSPORT OF RADIOPHARMACEUTICAS IPEN - CNEN / SP

Demerval Leônidas Rodrigues

ABSTRACT

When a package is shipped, people who work, live or travel in the route used for transportation of radioactive materials are irradiated, as well as those who are inside vehicles that travel in the same or opposite directions. Therefore, the proposed work has as main objective to estimate the radiological impact of the transportation of radiopharmaceuticals of IPEN-CNEN/SP to some predefined destinations. The doses in individuals who are in the public streets and in vehicles that travel close to the means of transportation, along the route traveled by packages, during the transport of radiopharmaceuticals were estimated. The doses were also estimated for drivers, from both the operation of driving the vehicle, and the loading and unloading of packages, because these tasks are performed by the drivers.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Desenvolvimento das recomendações internacionais: documentos de referência..	1
1.2	Limites por embalado estabelecidos pelo sistema Q.....	5
1.3	Considerações finais sobre o transporte de materiais radioativos.....	11
1.4	Finalidade deste trabalho.....	14
1.5	Objetivos do trabalho.....	14
1.6	Justificativa do trabalho.....	15
1.7	Fundamentos teóricos.....	16
1.7.1	Tipos de embalados.....	16
1.7.2	Categorias de embalados.....	18
2.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
2.1	Equipamentos utilizados.....	23
2.2	Embalados utilizados no transporte de radiofármacos.....	25
2.3	Meios de transporte utilizados para o transporte de radiofármacos.....	27
3.	MODELAGEM MATEMÁTICA.....	28
3.1	Doses resultantes nas operações de carga ou de descarga.....	31
3.2	Dose no trabalhador (motorista) do meio de transporte.....	33
3.3	Doses no público residente ao longo do percurso	34
3.4	Doses nas pessoas dos veículos que transitam no mesmo sentido que o meio de transporte.....	39
3.5	Doses nas pessoas dos veículos que transitam no sentido oposto.....	41
4.	IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO E SUAS INCERTEZAS.....	43
4.1	Implementação do modelo.....	43
4.1.1	Escolha do ponto lateral.....	43
4.1.2	Número de pistas.....	44
4.1.3	Coefficiente de absorção dos embalados.....	45
4.1.4	Ajustes do número de embalados.....	45

4.1.5	Considerações do modelo matemático.....	46
4.2	Tratamento de incertezas.....	46
4.2.1	Variâncias nas doses individuais resultantes das operações de carga e descarga.....	47
4.2.2	Variância nas dose das pessoas do meio de transporte.....	49
4.2.3	Variância no ponto lateral.....	49
4.2.4	Variâncias nas doses dos indivíduos do público.....	49
4.2.5	Parâmetros considerados constantes.....	50
5.	CÁLCULO DE DOSES.....	51
5.1	Doses medidas experimentalmente nos trabalhadores resultantes dos transportes de embalados para o Aeroporto de Congonhas.....	52
5.2	Doses medidas experimentalmente nos trabalhadores resultantes dos transportes de embalados para o Aeroporto Internacional de Guarulhos (Cumbica).....	55
5.3	Doses medidas experimentalmente nos trabalhadores resultantes dos transportes de embalados para a Cidade do Rio de Janeiro.....	57
5.4	Doses medidas experimentalmente nos trabalhadores resultantes dos transportes de embalados para a Cidade de Belo Horizonte.....	59
5.5	Doses anuais na população e nos trabalhadores resultantes dos transportes de embalados para o Aeroporto de Congonhas.....	61
5.6	Doses anuais na população e nos trabalhadores resultantes dos transportes de embalados para o Aeroporto de Congonhas utilizando um fator de absorção para a cabine do meio de transporte.....	64
5.7	Doses anuais na população e nos trabalhadores resultantes dos transportes de embalados para o Aeroporto Internacional de Guarulhos (Cumbica).....	66
5.8	Doses anuais na população e nos trabalhadores resultantes dos transportes de embalados para o Aeroporto Internacional de Guarulhos (Cumbica) utilizando um fator de absorção para a cabine do meio de transporte.....	69
5.9	Doses anuais na população e nos trabalhadores resultantes dos transportes de embalados para a Cidade do Rio de Janeiro.....	71
5.10	Doses anuais na população e nos trabalhadores resultantes dos transportes de embalados para a Cidade do Rio de Janeiro utilizando um fator de absorção para a cabine do meio de transporte.....	75
5.11	Doses anuais na população e nos trabalhadores resultantes dos transportes de embalados para a Cidade de Belo Horizonte.....	77

5.12	Doses anuais na população e nos trabalhadores resultantes dos transportes de embalados para a Cidade de Belo Horizonte utilizando um fator de absorção para a cabine do meio de transporte.....	81
6.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	83
6.1	<i>Cálculos das doses na população residente junto às vias de transporte...</i>	83
6.2	Cálculos das doses nas pessoas que estão nos veículos que trafegam nas vias próximas ao meio de transporte.....	85
6.3	Cálculos das doses nos trabalhadores (motoristas) que conduzem os meios de transporte para os quatro destinos.....	87
6.4	Cálculos das doses anuais nos trabalhadores resultantes das operações de carga e descarga dos embalados.....	88
6.5	Cálculos das doses anuais nos trabalhadores resultantes das operações de transporte, carga e descarga dos embalados, para cada percurso.....	90
6.6	Cálculos das doses coletivas anuais para cada percurso para realizar um futuro trabalho de otimização.....	91
6.7	Comparação dos resultados obtidos com os limites anuais pertinentes.....	93
7.	CONCLUSÕES	94
8.	FUTUROS TRABALHOS	96
ANEXO	PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA CÁLCULO DE DOSES	98
A.1	Apresentação da listagem do programa computacional.....	97
A.2	Módulo main.cpp.....	98
A.3	Módulo carga. h.....	99
A.4	Módulo carga.cpp.....	100
A.5	Arquivo de entrada de dados "transporte.txt".....	109
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112

1. INTRODUÇÃO

1.1 Desenvolvimento das recomendações internacionais: documentos de referência

Desde a década de 50, vem crescendo o desenvolvimento da indústria nuclear, bem como a utilização de materiais radioativos na medicina, indústria e pesquisa, entre outras aplicações. Em função desse desenvolvimento, foi reconhecida mundialmente, já àquela época, a necessidade de serem desenvolvidos requisitos de proteção e segurança para o transporte, o manuseio e o armazenamento de tais materiais e que fossem estabelecidos acordos internacionais nessa área. A aceitação internacional tornou-se vital, tendo em vista ser o transporte o único aspecto que envolve o controle de materiais radioativos entre fronteiras. Mesmo no transporte doméstico, podem estar envolvidos transportadores e embalados internacionais.

A Organização das Nações Unidas (ONU), em outubro de 1956, aprovou os estatutos da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), que entraram em vigência em 29 de julho de 1957 [1]. O papel destinado à AIEA em sua criação foi a de promover as aplicações pacíficas da energia atômica para o benefício da humanidade e simultaneamente resguardar a propagação de seu uso de forma destrutiva ou nociva de maneira a proteger o homem e o meio ambiente [2].

Antes da publicação do primeiro regulamento [3] da AIEA em 1961, os diversos controles internacionais eram, na maioria, baseados nos regulamentos da Comissão de Comércio Interestadual dos Estados Unidos que tinham como objetivo primordial facilitar o movimento de minérios radioativos e concentrados, bem como embalados contendo pequenas quantidades de radionuclídeos de uso médico e industrial. Entretanto, a rápida expansão da indústria nuclear mostrou que seria necessário o desenvolvimento dos regulamentos que fossem utilizados, de forma a facilitar a movimentação segura de todos os tipos e quantidades desses materiais radioativos.

Uma das primeiras tarefas iniciadas pela AIEA, depois de sua criação, foi o desenvolvimento de normas reguladoras para garantir a segurança nas atividades de transporte de materiais radioativos. Por isso, em julho de 1959, o Conselho Econômico e Social das Nações Unidas confiou à AIEA a tarefa de elaborar as recomendações para o transporte de substâncias radioativas. Como resultado deste esforço e com a ajuda de peritos de várias partes do mundo, foi publicada a primeira edição dos Regulamentos da AIEA para Transporte Seguro de Material Radioativo [3]. Esta primeira edição do regulamento estabeleceu regras básicas para as normas de embalagem e projeto dos embalados, para contenção de materiais radioativos e para a prevenção da criticalidade em relação às substâncias radioativas fissionáveis. Tais regulamentos deveriam ser diretamente aplicados às próprias operações da Agência, bem como em todas as atividades por ela apoiadas, nos Estados Membros. Assim, os requisitos da AIEA foram e continuam sendo recomendados como base para os regulamentos aplicáveis a todas as modalidades de transportes nacionais e internacionais de materiais radioativos, tanto aos seus Estados Membros, como às Organizações Internacionais.

Assim, mundialmente, a AIEA assumiu a liderança para o estabelecimento de regulamentos de transporte e desde então vem realizando vários esforços para elaborar e manter seu regulamento para o transporte seguro de materiais radioativos. Estes regulamentos são os únicos da AIEA que são adotados na íntegra internacionalmente.

Ainda em 1961, a AIEA editou um segundo documento intitulado *Notes on Certain Aspects of the Regulations, Safety Series n. 7* [4], provendo explicações e orientações pertinentes ao uso dos novos regulamentos. Este documento de consenso entre os Estados Membros integrantes da AIEA e, portanto, consenso internacional, continha informações de *como e porquê* utilizar os regulamentos de transporte.

A adoção mundial do regulamento da AIEA para todas as modalidades de transporte permitiu alcançar um grau muito elevado de proteção e segurança no transporte. Por isso foram criadas expectativas de que os princípios básicos estabelecidos nos regulamentos permanecessem aceitáveis por um período longo e também que a experiência na sua utilização fornecesse dados para uma possível revisão, após cinco anos. Assim, foram editadas mais três revisões [5, 6 e 7], sendo que a edição de 1973 [7] foi republicada no ano de 1979 [8].

Em função da complexidade dos regulamentos, a Agência publicou outro documento [9], também explicador e orientador, onde descrevia técnicas, práticas e métodos necessários para que fossem atingidos os objetivos de proteção e segurança estabelecidos nos regulamentos de transporte.

Uma versão atualizada do documento explicador e orientador foi publicada em 1982 [10]. Após extenso processo de revisão com a participação dos Estados Membros e várias Organizações Internacionais envolvidas com o transporte de materiais radioativos, a AIEA publicou, em 1985, a revisão do regulamento de transporte [11], incluindo todas as modificações propostas para a edição de 1973, e novamente revisada em 1979 [8]. Foi publicada ainda uma terceira edição em 1987 [12] do documento explicador e orientador, neste caso para englobar as modificações propostas pela edição dos regulamentos de transporte de 1985 [11].

A Agência Internacional de Energia Atômica editou, em 1986, mais um documento, intitulado *Schedules of requirements for the transport of specific types of radioactive material consignments, Safety Series No. 80* [13], apresentando um resumo dos requisitos estabelecidos e tornando mais prática a consulta aos regulamentos de transporte. O documento contém, para cada material especificado, requisitos resumidos para embalados, embalagens, limites em atividade, níveis de radiação e contaminação, entre outros.

Também em 1987, foi emitida uma segunda edição do regulamento *Safety Series No. 7* de 1961, com novo título [14]. Esse documento, um dos mais importantes dos que fornecem suporte aos regulamentos de transporte, estabelece em detalhes as bases dos requisitos de proteção e segurança, incluindo os cenários considerados e os modelos dosimétricos.

No ano de 1988, aproveitando a experiência adquirida na aplicação do regulamento e as diversas sugestões de alterações, a AIEA publicou o documento [15] complementando o regulamento de 1985 [11].

A edição de 1996 do regulamento de transporte foi publicada com uma nova nomenclatura, identificada como *Safety Standards Series No. TS-R-1*, [16] em lugar de *Safety Séries No. 6*.

No ano de 2000 foi publicada uma edição revisada do ST-1. Esta edição foi identificada como *Safety Standards Series No. TS-R-1 (ST-1, Revised)*, [17]. Esta edição foi revisada em 2003 [18] e novamente em 2005 [19].

Foi recomendada pela AIEA uma data mundial (1 de janeiro de 2001) para a incorporação dos requisitos de segurança constantes no TS-R-1, quer pelos Estados Membros, quer pelos Organismos Internacionais que regulam a matéria. Esta data mostrou-se logo não ser adequada para implementação mundial, apesar de esforços no âmbito internacional para que isto acontecesse. Alguns organismos internacionais mostraram-se favoráveis a incorporar, em um tempo previsto, os requisitos constantes no TS-R-1 [17].

Estão previstas revisões dos regulamentos pela AIEA, tendo essa decisão sido aprovada no Comitê Permanente para Padrões de Segurança no Transporte de Materiais Radioativos, no qual o Brasil tem representação. Os ciclos revisionais foram estabelecidos como sendo bianuais e a última edição revisada do TS-R-1 é de 2005 [19], publicada em 17 de setembro de 2005. Portanto, a AIEA não está cumprindo os ciclos revisionais.

Durante o processo de revisão dos regulamentos de transporte, houve consenso na AIEA sobre a consolidação dos dois documentos explicadores e orientadores, *Safety Series No.º 7 e Safety Series No. 37*, em um único documento; isso traria uma vantagem na consolidação das informações necessárias ao atendimento dos requisitos de proteção e segurança estabelecidos, além de evitar duplicidade de informações. Esse documento foi intitulado *Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material* [20]. O objetivo do novo documento é prover os Estados Membros com informações que permitam atender e demonstrar conformidade aos requisitos de proteção e segurança estabelecidos nos regulamentos de transporte.

É importante lembrar que este documento não tem caráter prescritivo. Apenas são apresentadas recomendações de como atender os regulamentos de transporte sem, contudo, estabelecer que a única maneira deste atendimento é o que está descrito no documento.

1.2 Limites por embalado estabelecidos pelo sistema Q

Originalmente, como pode ser verificado em diversas publicações [3, 6, 7 e 8], os radionuclídeos eram classificados em sete grupos, cada grupo contendo um limite para o embalado do tipo A, em forma especial, não sujeito à dispersão, como cápsulas seladas, e sob outras formas, materiais dispersíveis, por exemplo, líquidos ou gases. Este conceito foi modificado, tendo sido desenvolvido o sistema A_1/A_2 [8, 10 e 12], onde foram estabelecidos limites para embalados chamados Tipo A. O conteúdo seria classificado em função de valores de atividade, nomeados de A_1 e A_2 , onde A_1 seria o valor da máxima atividade de um material radioativo sob forma especial que poderia ser transportado em um embalado do Tipo A; e A_2 , a máxima atividade de um material radioativo sob outra forma, que poderia ser transportado em um embalado do Tipo A.

Assim, o novo sistema criou valores fixos para radionuclídeos individuais que poderiam estar contidos em uma embalagem do Tipo A. As bases dosimétricas para o sistema A_1/A_2 eram sustentadas por considerações pragmáticas, com algumas inconsistências, em especial, com relação ao risco envolvido para cada radionuclídeo, portanto hipotéticas, sem se basear em casos reais. Sem uma fundamentação científica razoável, um limite de dose de corpo inteiro foi considerado como sendo 30 mSv; entretanto, para o cálculo de A_1 , a exposição foi limitada em 0,75 C/kg (3 R), a uma distância de 3 m, num período de 3 horas [12]. Nessa mesma referência, para o cálculo de A_2 , foi considerada uma incorporação de $10^{-6} A_2$, o que levaria à metade do limite anual de incorporação para trabalhadores [21], como resultado de uma situação anormal de proporções médias.

Segundo a AIEA [12], Macdonald e Goldfinch, por meio de um acordo de pesquisa com a AIEA, desenvolveram o sistema Q. O sumário do relatório dessa pesquisa foi publicado em 1986 [22].

Com o advento do sistema Q, foram incluídas novas considerações acerca de cenários de exposição, embora tivessem sido mantidas algumas suposições do sistema anterior. Nas situações envolvendo incorporações de radionuclídeos, foram utilizados novos dados recomendados internacionalmente [23 e 24]. Em particular, foram incluídas considerações relativas à extensão do dano na embalagem e à liberação do conteúdo radioativo.

Por meio do sistema Q, que é composto por um conjunto de cenários de exposição externa e interna à radiação, são obtidos valores limites para o conteúdo, em atividade individual de radionuclídeos (Bq) que podem ser transportados em embalagens e meios de transporte, valores máximos de taxas de exposição na superfície e a 1 metro de embalados e em meios de transporte. Esses limites são utilizados com vários propósitos dentro dos regulamentos, como, por exemplo, para a classificação de tipos de embalados.

O sistema Q considera uma série de vias de exposição para as pessoas que estão nas proximidades de um Embalado do Tipo A envolvido em um incidente ou acidente grave de transporte. Na Figura 1.1 são ilustradas esquematicamente as vias dosimétricas que levam a cinco valores limites para o conteúdo do embalado em atividade:

- Q_A para doses externas devidas a fótons;
- Q_B para doses externas devidas a emissores beta;
- Q_C para doses por inalação;
- Q_D para doses na pele e ingestão, resultantes da transferência de contaminação; e
- Q_E para doses por imersão.

As hipóteses específicas sobre as vias de exposição usadas na derivação de valores individuais Q estão baseadas nos seguintes critérios radiológicos:

- a) A dose efetiva, ou a dose comprometida efetiva, de uma pessoa exposta próxima de um embalado de transporte depois de uma situação anormal não deverá exceder uma dose de referência de 50 mSv;
- b) A dose equivalente, ou dose equivalente comprometida, recebida por órgãos individuais, incluindo a pele de uma pessoa envolvida em uma situação anormal, não deverá exceder 0,5 Sv ou no caso especial do cristalino do olho 0,15 Sv; e
- c) É improvável que uma pessoa permaneça por mais de 30 minutos a uma distância de um metro do embalado danificado.

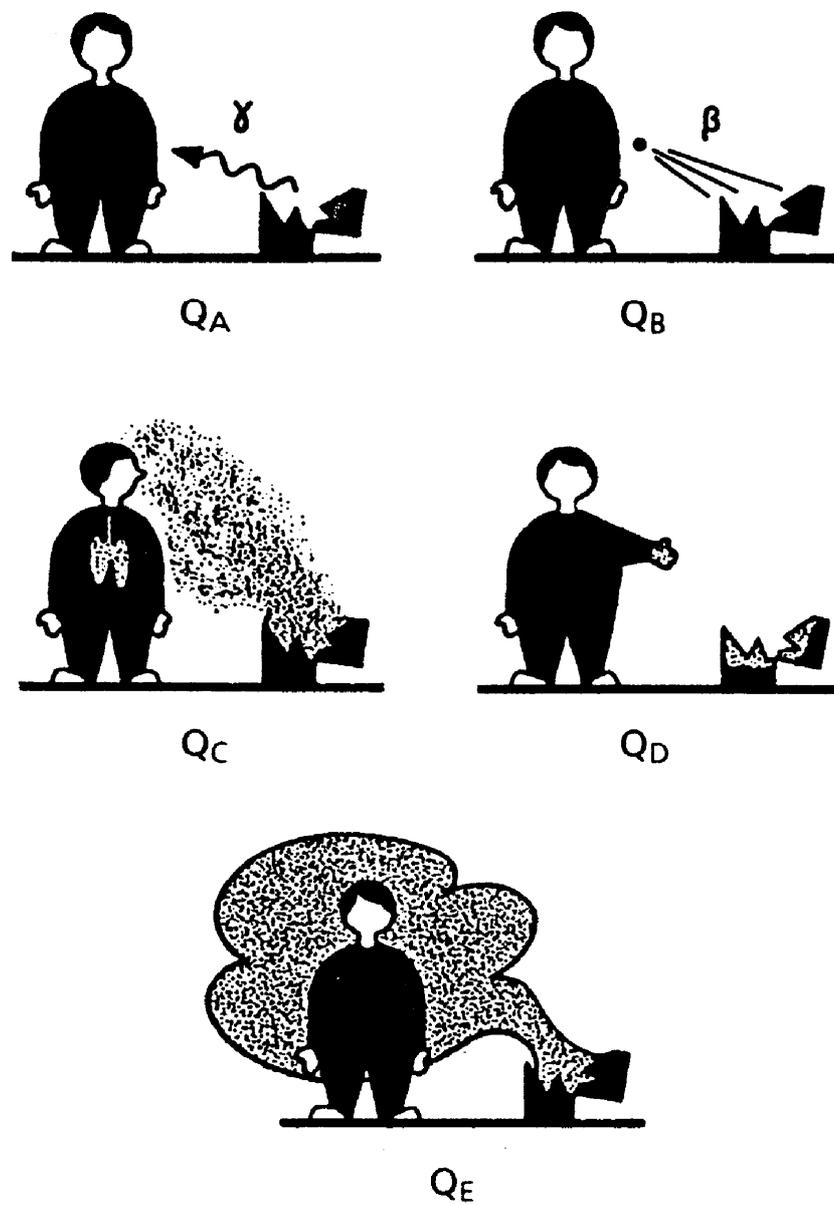


FIGURA 1.1- Representação das vias de exposição utilizadas no sistema Q [22]

Ressalta-se que o sistema Q está baseado primordialmente em condições anormais envolvendo dano no embalado Tipo A e nas doses recebidas pelos trabalhadores, e não considera as doses recebidas pelos indivíduos do público. Uma das finalidades deste trabalho é estimar as doses na população em virtude do transporte rotineiro de embalados contendo radiofármacos do IPEN-CNEN/SP, caracterizando assim, o ineditismo deste trabalho.

Outro fato inédito e de grande importância no presente trabalho é a estimativa de doses nos trabalhadores envolvidos nas operações de carga, descarga e transporte de radiofármacos do IPEN – CNEN/SP. Estes resultados poderão ser utilizados pelas empresas envolvidas com o transporte destes materiais radioativos ou outros similares, como uma ferramenta de planejamento prévio, para estimar custos e necessidades de infraestrutura, uma vez que será de conhecimento o comportamento das doses nas operações de carga, descarga e transporte dos embalados em função da unidade de índice de transporte “IT” e também em função dos intervalos de tempos envolvidos nas operações de transportes.

Dessa forma, podem ser facilmente estimadas as quantidades de veículos e de trabalhadores necessários para a realização do transporte de uma quantidade de embalados, já que serão conhecidos de antemão o IT médio, seus destinos e intervalos de tempos.

Por fim, é legítimo afirmar que os resultados alcançados pela AIEA na utilização de seus regulamentos só foram possíveis em virtude da participação de várias organizações internacionais, entre as quais se destacam:

(i) *United Nations Economic and Social Council Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods* (UM-ECOSOC), constituído de especialistas da Organização das Nações Unidas – ONU, é responsável pela emissão de recomendações sobre transporte de produtos perigosos a serem utilizados mundialmente. A publicação sobre essas recomendações são conhecidas internacionalmente como *Orange Book*;

(ii) *International Maritime Organization* (IMO), com responsabilidade sobre o *International Maritime Dangerous Goods Code* – (IMDG Code), regula internacionalmente, o transporte de materiais perigosos pelo mar;

(iii) *International Civil Aviation Organization* (ICAO) elabora padrões de segurança para o transporte de materiais perigosos a serem transportados pelo ar;

(iv) *Universal Postal Union* (UPU) é responsável pelo transporte postal de materiais radioativos, e

(v) na Europa, o transporte de produtos perigosos é regulado pelo *International Carriage of Dangerous Goods by Rail* (RID), para vias férreas, pelo *International Carriage of Dangerous Goods by Road* (ADR), para rodovias; e pelo *International Carriage of Dangerous Goods by on Inland Waterways* (ADN), para vias fluviais.

Por último, é importante lembrar que, no Brasil, está em vigor a Norma CNEN-NE-5.01 “Transporte de Materiais Radioativos”, de julho de 1988 [25]. Esta norma, baseada no *Safety Series No. 6*, Edição de 1985, está bastante desatualizada em relação aos novos requisitos estabelecidos pela AIEA, cuja adoção já foi feita por praticamente todos os Estados Membros daquela Agência. No entanto, a Norma CNEN-NE-5.01 está atualmente em processo final de revisão, com previsão de publicação em 2009.

É importante frisar que toda a literatura da AIEA, anteriormente citada, contém diferentes considerações para o estabelecimento de limites, em especial na determinação do conteúdo de material radioativo permitido por tipo de embalado, material de baixa atividade específica e materiais exceptivos.

1.3 Considerações finais sobre o transporte de materiais radioativos

Ainda que o material radioativo esteja sendo utilizado por mais de um século, o uso significativo para propósitos benéficos para a sociedade só começou no final da década de 40 e início da de 50. Naquele momento, o aumento considerável da utilização de material radioativo e a conseqüente movimentação deste material entre países apontaram para a necessidade de elaboração de normas e para a assinatura de um acordo internacional, de forma a garantir a segurança no transporte, armazenamento e manuseio desse material, além de proteger adequadamente o homem e o meio ambiente. Foi estimado que a cada ano, em todo o mundo, são realizados entre 18 e 38 milhões de expedições de embalados, sendo que em sua maioria são embalados do Tipo A [26].

Os regulamentos de transporte de materiais radioativos [3, 5, 6, 7, 8 e 11] têm como objetivo estabelecer requisitos de proteção e segurança a fim de garantir um grau adequado de controle da eventual exposição de pessoas, bens e meio ambiente à radiação ionizante, tanto em condição normal como anormal, compreendendo: especificações sobre materiais radioativos para transporte; seleção do tipo de embalado; especificação dos requisitos de projeto e de ensaios de aceitação de embalados; disposições pertinentes ao transporte propriamente dito; responsabilidades e requisitos administrativos.

Os regulamentos são aplicáveis ao transporte por terra, água ou ar e estão baseados fundamentalmente na filosofia de que os materiais radioativos que estão sendo transportados devem ser embalados adequadamente para proporcionar proteção contra os riscos inerentes ao material em todas as condições de transporte, incluindo os incidentes e acidentes previstos. Dessa forma, a proteção e a segurança dependem principalmente do embalado e não dos controles operacionais. Os regulamentos estabelecem que o remetente deva ser o responsável por garantir a proteção e segurança durante o transporte, por meio da caracterização apropriada do conteúdo e de uma embalagem adequada, assim como para proporcionar procedimentos operacionais adequados, incluindo comunicações, documentos, marcação, rotulação e etiquetas, índices de transporte e de criticalidade, certificados de aprovação, nome apropriado da expedição e número das Nações Unidas.

Dessa forma, dependendo do tipo de material radioativo a ser transportado, em especial da atividade do conteúdo e da forma físico-química, são exigidos diferentes tipos de embalagens ou meios de transporte (veículo, para transporte rodoviário ou ferroviário) que variam dos mais simples aos mais sofisticados. Conseqüentemente, são mais dispendiosos e suas características devem atender a requisitos estabelecidos a partir de cenários de exposição à radiação ionizante, caracterizados por três patamares gerais de gravidade: condições rotineiras de transporte (sem situações anormais); condições normais de transporte (inclui situações anormais de conseqüências pequenas) e condições anormais (inclui incidentes e acidentes) durante o transporte.

A conclusão do exposto acima é que a proteção e a segurança no transporte de um determinado material radioativo estão associadas, principalmente, à seleção adequada do embalado e, conseqüentemente, aos custos de seu projeto e fabricação, que podem variar de uma centena a milhões de reais. Os requisitos exigidos para o projeto de embalados resultam em uma probabilidade muito pequena de liberação de atividade significativa como conseqüência de um incidente ou acidente muito grave. Portanto, o cenário associado à seleção do embalado deve estar bem fundamentado, de forma a não apenas minimizar custos, como também para garantir a proteção e a segurança no transporte do material radioativo, desde o local de embarque até o seu destino final.

Ainda objetivando estabelecer, segundo a AIEA [3], um controle sobre exposição à radiação, limites de conteúdo radioativo, categorias para rotulação, requisitos para uso exclusivo e para espaçamento durante o armazenamento em trânsito, entre outros, é atribuído um número para um embalado, pacote de embalados, tanque ou contêiner com material radioativo e material BAE-I. Esse número é conhecido como Índice de Transporte (IT). O índice de transporte, baseado no controle da exposição à radiação, é o número que expressa o nível de radiação máximo em mSv/h, a uma distância de 1 metro da superfície externa de embalados, pacotes de embalados, tanques ou contêineres, multiplicado por 100 e arredondado para cima até a primeira casa decimal, exceto quando for igual ou inferior a 0,05, caso em que pode ser considerado igual a zero.

Quando se tratar de embalados, pacotes de embalados, tanques ou contêineres contendo substâncias físséis, também será determinado o Índice de Segurança de Criticalidade (ISC), com a finalidade de prover o controle da acumulação de embalados, pacotes de embalados, tanques ou contêineres.

A proteção radiológica à pessoa pode ser dividida em duas áreas de atuação: proteção ao trabalhador, isto é, àquele indivíduo cujas atividades envolvam radiações ionizantes e materiais radioativos; e proteção aos indivíduos do público ou à população em geral, isto é, àquele grupo de indivíduos que não está envolvido diretamente em atividades com radiações ou materiais radioativos, mas que poderá sofrer as conseqüências delas por viver próximo a estas fontes de radiação ionizante.

Neste contexto, quando um embalado é transportado, as pessoas que trabalham, residem ou circulam no itinerário percorrido pelo transporte de materiais radioativos são irradiadas, assim como aquelas pessoas que estão dentro dos veículos que trafegam no mesmo sentido ou no sentido contrário, próximos aos meios de transporte.

1.4 Finalidade deste trabalho

Em função dos Índices de Transporte (IT) dos embalados transportados, das taxas de doses nas cabines dos veículos e dos tempos médios de entrega, o trabalho proposto tem como principal finalidade estimar as seguintes doses:

- ✓ nos indivíduos do público [19, 21,25 e 27], que estão nas residências, ruas e nos veículos que trafegam próximos dos meios de transporte nos dois sentidos, ao longo do itinerário percorrido pelos embalados, durante a realização dos transportes de radiofármacos do IPEN - CNEN/SP até alguns destinos previamente definidos;
- ✓ nos trabalhadores (motoristas), resultantes das operações de transporte dos embalados, e
- ✓ nos trabalhadores (motoristas), resultantes das operações de carga e descarga dos embalados.

1.5 Objetivos do trabalho

Para alcançar a finalidade do presente trabalho devem ser cumpridos os seguintes objetivos:

- 1) calcular as doses mínimas, máximas e médias dos indivíduos do público que permanecem nas residências próximas às vias de transporte;
- 2) calcular as doses mínimas, máximas e médias das pessoas que estão nos veículos que trafegam nas vias de transporte, no mesmo sentido e no sentido oposto do meio de transporte, tanto na mesma via como na via paralela;

- 3) calcular as doses nos trabalhadores, que conduzem os meios de transporte para cada destino do material radioativo;
- 4) calcular as doses nos trabalhadores nas operações de carga e descarga dos embalados;
- 5) calcular as doses coletivas anuais para cada percurso para realizar um futuro trabalho de otimização; e
- 6) comparar os resultados obtidos com os limites anuais pertinentes.

1.6 Justificativa do trabalho

Como será mostrado no decorrer deste trabalho, as atuais normas e os regulamentos de transporte estão baseadas em um limite “*ad hoc*”; para os trabalhadores é de 30mSv/ano [7], sem considerar que estão envolvidos, também, indivíduos do público.

Neste caso, acredita-se ser importante demonstrar com um exemplo real, quais são as estimativas de doses dos trabalhadores e do público de forma a se poder fazer uma comparação com os seus respectivos limites anuais internacionalmente e nacionalmente estabelecidos.

1.7 Fundamentos teóricos

Para fins deste trabalho foram adotadas as definições constantes na Norma CNEN-NE-5.01 “Transporte de Materiais Radioativos”, publicada em julho de 1988 [25].

1.7.1 Tipos de embalados

O tipo do embalado para transporte de determinado conteúdo radioativo, por determinado meio de transporte, com vistas ao desempenho adequado da respectiva embalagem, em termos de sua integridade, deve ser selecionado dentre um dos cinco tipos primários e deve ser explicitado, em cada caso, se o embalado contém material físsil. Os embalados que podem ser utilizados para o transporte de materiais radioativos são os seguintes:

- Embalados Exceptivos;
- Embalados Industriais;
- Embalados Tipo A;
- Embalados Tipo B; e
- Embalados Tipo C.

Os Embalados Exceptivos são aqueles nos quais o conteúdo radioativo permitido é restrito a níveis tão baixos que os perigos potenciais são insignificantes. Assim, nenhum teste é requerido com relação à capacidade de retenção do conteúdo do embalado ou da integridade da blindagem [19, 20 e 25]. Exige-se, entretanto, que o nível de radiação máximo na superfície de um embalado exceptivo não exceda a 5 $\mu\text{Sv/h}$, de forma a assegurar que material fotográfico nas proximidades não seja danificado.

Os Embalados Industriais são aqueles com conteúdo radioativo limitado, em conformidade com os requisitos específicos da AIEA [19 e 25], e devem ser classificados, por nível de integridade, em um dos três seguintes tipos:

O mais simples, o Embalado do Tipo EI-1, foi concebido para reter o conteúdo radioativo em condições rotineiras de transporte.

Os Embalados do Tipo EI-2 e EI-3 foram projetados para prevenir a perda ou a dispersão do conteúdo radioativo em condições normais de transporte e devem resistir a testes especificados, simulando essas condições de transporte

Os Embalados do Tipo A foram projetados para prover transporte econômico para um número significativo de expedições, com baixa atividade radioativa, alcançando, ao mesmo tempo, um nível alto de segurança. Os limites de conteúdo de Embalados do Tipo A são fixados, de forma a assegurar que as consequências radiológicas resultantes de um dano severo a um embalado desse tipo são aceitáveis e, assim sendo, não é requerida a aprovação do projeto pela autoridade competente, com exceção dos embalados contendo material físsil.

Os Embalados do Tipo B foram projetados para transportar conteúdos radioativos com atividades superiores aos prescritos para Embalados do Tipo A. Estes embalados possuem requisitos específicos estabelecidos pela AIEA [19 e 25], sendo necessária a aprovação do projeto do embalado pela autoridade competente. Os requisitos de transporte exigidos para Embalados do Tipo B são estabelecidos, de forma a reduzir a um nível muito baixo a probabilidade de liberação radioativa significativa, proveniente de tal embalado, após um acidente severo de transporte [20]. Os Embalados do Tipo B são ainda classificados como do Tipo B(U) e Tipo B(M).

Os Embalados do Tipo C devem ser capazes de cumprir todos os requisitos estabelecidos para Embalado do Tipo B, e devem ainda ser capazes de resistir a um acidente severo no transporte aéreo, sem perda de retenção do conteúdo radioativo ou aumento do nível de radiação externo, a um nível que possa por em perigo o público ou os que estiverem envolvidos em operações de resgate ou de descontaminação. Desse modo, o projeto do embalado prevê que ele seja recuperado de modo seguro, mas sua reutilização não seria necessariamente possível.

Finalmente, para a seleção dos embalados descritos, devem ser inicialmente identificadas a natureza do conteúdo radioativo e sua atividade total. A partir dos valores básicos de atividade (A_1 e/ou A_2) dos radionuclídeos presentes, deve ser então avaliado o atendimento aos requisitos de limitação de atividade aplicáveis a cada tipo de embalado e, uma vez selecionado o tipo de embalado, devem ser obedecidos os requisitos de projeto aplicáveis, em sua preparação para transporte.

Lembrando que, por definição, o embalado é o volume apresentado para transporte, abrangendo a embalagem e o respectivo conteúdo radioativo e meio de transporte é uma expressão que abrange qualquer veículo, para transporte rodoviário ou ferroviário; ou embarcação, porão, paiol ou praça definida como convés, para transporte aquaviário; ou aeronave para transporte aéreo.

1.7.2 Categorias de embalados

Os embalados ou pacotes de embalados, para fins de reconhecimento imediato do respectivo potencial, devem ser enquadrados em uma das categorias para rotulação em conformidade com os níveis de radiação que constam na Tabela 1.1 e devem ser rotulados de acordo com as seguintes categorias: I-Branca, II-Amarela, III-Amarela ou III-Amarela sob uso exclusivo, Figura 1.1.

TABELA 1.1 – Categorias de embalados

CONDIÇÕES		CATEGORIA
ÍNDICE DE TRANSPORTE (IT)	NÍVEL DE RADIAÇÃO MÁXIMO EM QUALQUER PONTO DA SUPERFÍCIE EXTERNA (NRM) (mSv/h)*	
0	$NRM \leq 0,005$	I - BRANCA
$0 < IT \leq 1$	$0,005 < NRM \leq 0,5$	II - AMARELA
$1 < IT \leq 10$	$0,5 < NRM \leq 2$	III - AMARELA
$IT > 10$	$2 < NRM \leq 10$	III – AMARELA E SOB USO EXCLUSIVO

(*) 1 mSv/h = 100 mrem/h

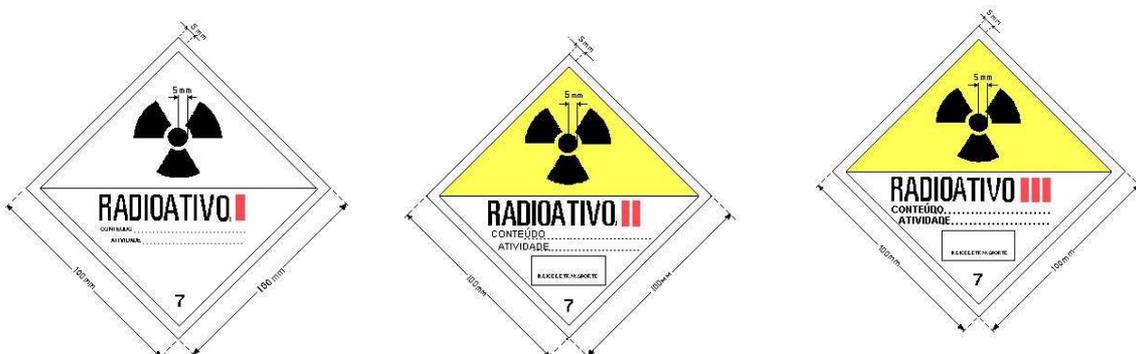


FIGURA 1.1 – Rótulos para embalados

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para se obter uma avaliação do impacto radiológico em condições normais de transporte, resultantes do transporte dos radiofármacos do IPEN – CNEN/SP, foram definidos quatro principais destinos, a saber: Aeroporto de Congonhas (São Paulo), Aeroporto de Cumbica (Guarulhos), Cidade do Rio de Janeiro e Cidade de Belo Horizonte. Estes destinos representam de forma significativa a totalidade da distribuição dos radiofármacos do IPEN – CNEN/SP contendo ^{99m}Mo e ^{131}I , quanto aos trajetos, tempos envolvidos e população dos arredores.

Na execução deste trabalho foram considerados apenas os embalados com rótulos de categoria II-Amarela e III-Amarela, contendo geradores de tecnécio (^{99m}Mo) e ^{131}I , pois são estes tipos de embalados que contribuem com quase a totalidade das doses para o público e para os trabalhadores envolvidos nas operações de carga, descarga e transporte, conforme demonstraram estudos precedentes [28, 29 e 30].

Os demais embalados são com rótulos de categoria “I-Branca”, ou seja, nível de radiação máximo em qualquer ponto da superfície externa do embalado menor ou igual a 0,005 mSv/h e a um metro de distância igual a zero (IT) ou com rótulo de categoria “II-Amarela”, mas de IT mínimo. Portanto, do ponto de vista de radioproteção, representam um impacto radiológico desprezível.

O período de amostragem correspondeu aos meses compreendidos entre janeiro e dezembro de 2008. O número de trabalhadores (motoristas) envolvidos nos transportes destes materiais foram 23 e pertencem a seis empresas que atuam no transporte de materiais radioativos do IPEN – CNEN/SP. Todos os trabalhadores são monitorados individualmente, ou seja, são considerados Indivíduos Ocupacionalmente Expostos (IOEs).

Os trabalhadores, além de conduzirem os veículos, realizam também os carregamentos e descarregamentos dos embalados, ou seja, as operações de carga e descarga. Para determinar as doses resultantes das operações de carga dos embalados, foi fornecido um dosímetro de leitura direta (caneta dosimétrica) para cada trabalhador e registrada sua leitura depois de finalizada cada operação. Considera-se que as doses recebidas pelos trabalhadores nas operações de descarga são iguais às doses recebidas nas operações de carga.

São realizadas medidas na superfície externa e a um metro de distância da superfície de cada embalado a ser transportado para determinação do seu IT. Já no meio de transporte, são realizadas medidas em sua superfície externa, na cabine e a dois metros de distância da superfície externa do meio de transporte. Todas essas medidas são registradas em um documento que acompanha o transporte, Figura 2.1.

Também são realizadas medidas para se verificar possíveis contaminações removíveis nos embalados e no meio de transporte, depois de finalizada cada operação de transporte.

Para realizar o cálculo das doses nos trabalhadores (IOEs) são utilizadas as medidas e as informações registradas no documento apresentado na Figura 2.1, que são a taxa de dose medida na cabine do meio de transporte, o IT de cada embalado e a somatória dos ITs dos embalados em cada expedição, ou seja, em cada meio de transporte.

Ficha de Monitoração da Carga e da Unidade de Transporte				
Expedidor: Comissão Nacional de Energia Nuclear/SP Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária - CEP 05508-000 ??? Fone: (0XX11)38169000 São Paulo - Estado de São Paulo				
Transportador:				
Endereço:				
CARGA				
MATERIAL	ATIVIDADE (Bq)	NO. DE VOLUMES	IT	ISC
TOTAL				
MONITORAÇÃO DA UNIDADE DE TRANSPORTE				
POIOTOS	ESPECIFICAÇÃO	TAXA DE DOSE (___Sv/h)		CROQUI
		SUPERFÍCIE	2 METROS	
A	LATERAL ESQUERDA			
B	TRASEIRA			
C	LATERAL DIREITA			
CABINE DO MOTORISTA:		$\mu\text{Sv/h}$		
MONITOR UTILIZADO	MARCA	MODELO	IDENTIFICAÇÃO	
UNIDADE DE TRANSPORTE				
MARCA:	MODELO:	PLACAS:		
RÓTULOS DE RISCO	<input type="checkbox"/> TRASEIRA	<input type="checkbox"/> LATERAIS		
PAINÉIS DE SEGURANÇA	<input type="checkbox"/> TRASEIRA	<input type="checkbox"/> LATERAIS	<input type="checkbox"/> DIAANTEIRA	
TRANSPORTADOR				
MOTORISTA:		ASSINATURA:		
AJUDANTES:				
RADIOPROTEÇÃO				
SUPERVISOR:		LOCAL/DATA:		
TÉCNICO:				

1ª via: Transportador 2ª via: EPR

FIGURA 2.1 – Documento utilizado no transporte de materiais radioativos expedidos pelo IPEN – CNEN/SP

2.1 Equipamentos utilizados

Neste trabalho, além dos dosímetros de leitura direta, Figura 2.2, portados pelos trabalhadores, foram utilizados alguns tipos de detectores de radiação ionizante, durante o monitoramento dos embalados e dos meios de transporte. Além do monitoramento dos níveis de radiação nos embalados e nos meios de transporte, foram realizadas medidas para se verificar a contaminação removível nos embalados e nos meios de transporte, depois de finalizado o descarregamento de todos os embalados transportados. Todas essas medidas foram utilizadas para o cálculo das doses envolvidas no transporte.



FIGURA 2.2 - Dosímetro de leitura direta (caneta dosimétrica)

- ✓ Medidor de taxa de exposição, modelo Teletector 6112B, Figura 2.3, de fabricação Automess, possuindo cada um dois tubos Geiger-Müller acoplados em sonda telescópica, que pode se estender a uma distância de até quatro metros; tem cinco escalas analógicas de 0 a 2 mR/h; de 0 a 5 mR/h; de 0 a 2 R/h; de 0 a 50 R/h e de 0 a 1.000 R/h, ou seja, nas unidades antigas de taxa de exposição.



FIGURA 2.3 - Medidor de taxa de exposição, modelo Teletector 6112B/D

- ✓ Monitor de radiação externa, modelo MC-1K, Figura 2.4, marca SE International. Possui um tubo Geiger-Müller e uma sonda com janela de mica, quatro escalas analógicas de 0 a 0,025 $\mu\text{C}/\text{kg.h}$; de 0 a 0,25 $\mu\text{C}/\text{kg.h}$; de 0 a 2,5 $\mu\text{C}/\text{kg.h}$ e de 0 a 25 $\mu\text{C}/\text{kg.h}$.



FIGURA 2.4 - Monitor de radiação externa, modelo MC-1K

- ✓ Monitor móvel para contagem, modelo MIP 10, Figura 2.5, de fabricação Nardeux, tipo Geiger-Müller, com janela aberta para radiação beta e fechada para gama, tem quatro escalas nas faixas de 0 a 10 cps, de 0 a 10^2 cps, de 0 a 10^3 cps e de 0 a 10^4 cps.



FIGURA 2.5 - Monitor móvel para contagem, modelo MIP 10

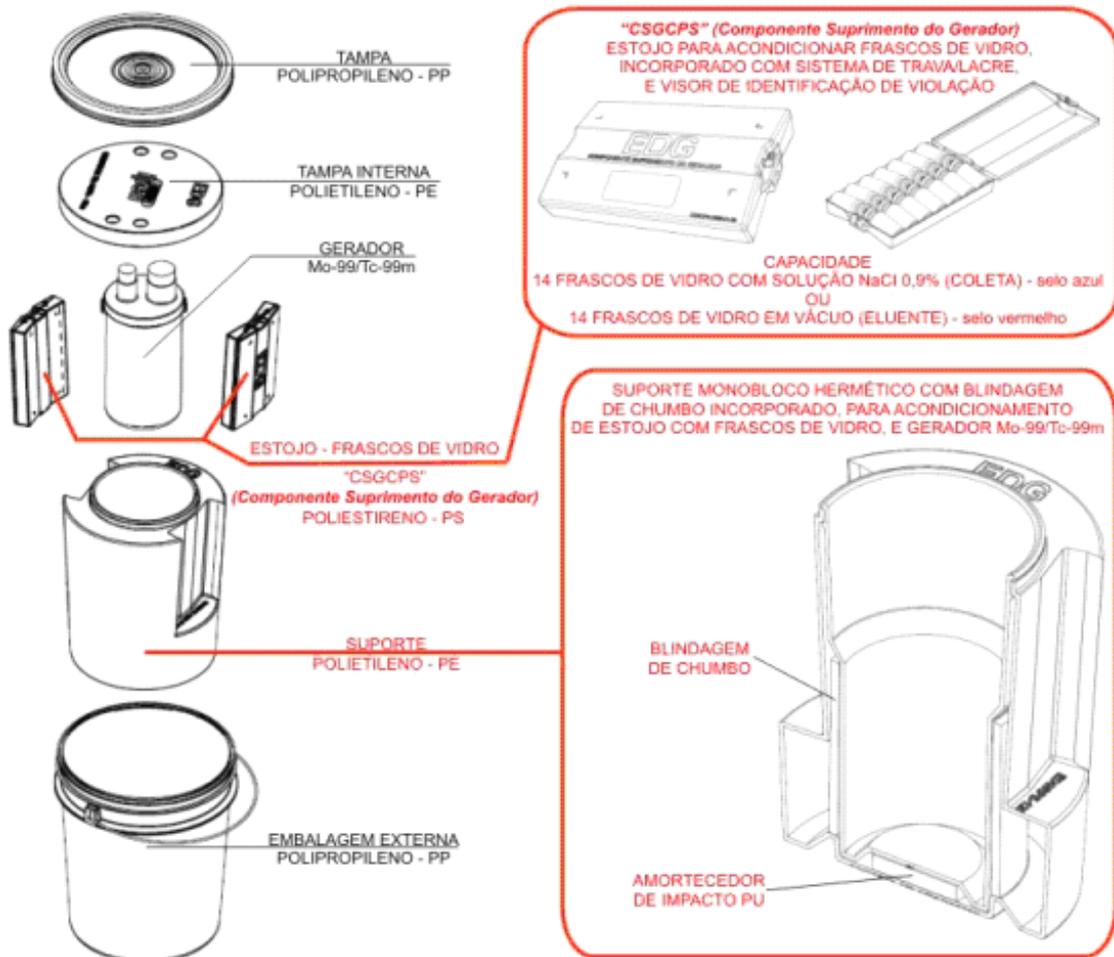
2.2 Embalados utilizados no transporte de radiofármacos

Os embalados utilizados para o transporte dos radiofármacos do IPEN – CNEN/SP, contendo geradores de tecnécio (^{99m}Mo) e ^{131}I , são do Tipo A. Os de cor azul são os embalados destinados ao transporte de geradores de tecnécio e os de cor branca são destinados ao transporte dos fármacos contendo ^{131}I . Na Figura 2.6, são mostrados os embalados já prontos para o transporte e na Figura 2.7, as principais características e a descrição da embalagem.



FIGURA 2.6 - Embalados do Tipo A, prontos para o transporte.

- **Segurança e Certificação CDTN** – A embalagem EDG foi submetida a testes de qualidade e segurança, e certificada por órgão competente CDTN:



Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

FIGURA 2.7 - Principais características e descrição da embalagem do Tipo A.

2.3 Meios de transporte utilizados para o transporte de radiofármacos

Os meios de transporte utilizados para a realização do transporte dos embalados contendo os radiofármacos do IPEN são de quatro modelos, conforme mostra a Figura 2.8. O acondicionamento dos embalados dentro dos veículos é realizado na forma 4x5x4, 4x4x2, 4x3x2 e 4x2x2. Existe, obrigatoriamente, uma separação física entre o condutor do meio de transporte e a carga (embalados).



FIGURA 2.8 - Meios de transporte utilizados para o transporte de radiofármacos

3. MODELAGEM MATEMÁTICA

Neste capítulo será descrita a modelagem matemática utilizada para o cálculo das doses de interesse a partir de equações largamente utilizadas na avaliação de projetos de blindagens [31 e 32].

Suponha um conjunto de n_e embalados, de raio r_e (m) e altura h (m), dispostos num arranjo com geometria paralelepípedica, como mostrado na Figura 3.1.

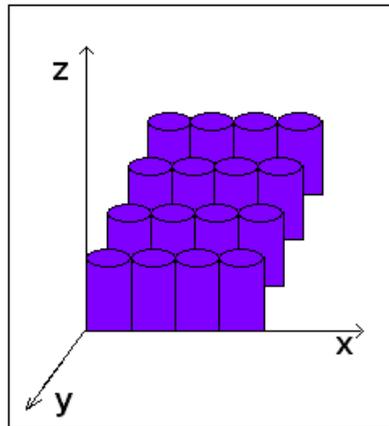


FIGURA 3.1 - Arranjo de embalados

As coordenadas do centro de um embalado $e(i,j,k)$, onde se localiza uma fonte radioativa nesse arranjo, são dadas por:

$$x_e(i,j,k) = (2i - 1) \cdot r_e \quad i = 1, \dots, n_x$$

$$y_e(i,j,k) = (2j - 1) \cdot r_e \quad j = 1, \dots, n_y$$

$$z_e(i,j,k) = (2k - 1) h/2 \quad k = 1, \dots, n_z$$

onde n_x , n_y e n_z são os números de embalados ao longo dos eixos x , y e z , respectivamente.

O número total de embalados no arranjo é dado por $n_e = n_x \cdot n_y \cdot n_z$.

A distância, d , entre o embalado $e(x_e, y_e, z_e)$ e um ponto $P(x,y,z)$ qualquer é dada por:

$$d^2(i,j,k) = [x - x_e(i,j,k)]^2 + [y - y_e(i,j,k)]^2 + [z - z_e(i,j,k)]^2 \quad (1)$$

Seja I_t o índice de transporte médio dos embalados. O índice de transporte é a taxa de dose (mrem/h) a um metro de distância da superfície externa do embalado. A taxa de dose, \dot{D}_e (mrem/h), na superfície de um embalado é dada por:

$$\dot{D}_e = \frac{I_t \cdot (1 + r_e)^2}{r_e^2} \quad (\text{mrem/h})$$

Admitindo que um embalado ofereça uma espessura média de blindagem x , em qualquer direção, a taxa de dose ($\mu\text{Sv/h}$) em um ponto $P(x,y,z)$ situado a uma certa distância do conjunto de embalados, é dada por:

$$\dot{D}_P = 10 \cdot I_t \cdot (1 + r_e)^2 \cdot \sum_{k=1}^{nz} \sum_{j=1}^{ny} \sum_{i=1}^{nx} \frac{e^{-(n-m) \cdot (\mu_{en} \cdot x)_{emb}}}{d_{ijk}^2} \quad (\mu\text{Sv/h}) \quad (2)$$

onde:

D_p é a taxa de dose a uma distância d do conjunto de embalados;

μ_{en} é o coeficiente de absorção de energia do embalado (m^{-1});

$m = j$ e $n = ny$, se o ponto P estiver localizado à frente do meio de transporte;

$m = i$ e $n = nx$, se o ponto P estiver localizado na lateral do meio de transporte.

No referencial adotado, a largura do compartimento de carga do meio de transporte dos embalados é medida ao longo do eixo x e seu comprimento é medido ao longo do eixo y , de forma que a distância percorrida pelo veículo é medida ao longo do eixo y . Todas as distâncias são dadas em relação à origem do sistema de coordenadas.

Neste modelo, nas operações rotineiras, os embalados contendo radiofármacos são retirados pelo trabalhador do local de armazenamento no IPEN – CNEN/SP, Figura 3.2, levados para o compartimento de carga do meio de transporte e depois transportados para o destino. A entrega dos embalados aos destinatários ocorre ao longo do percurso e a quantidade de embalados entregues a cada destinatário não é constante. Por esse motivo, no modelo, foi considerado que a operação de descarga tem o mesmo comportamento da operação de carga, isto é, os tempos envolvidos são os mesmos e a forma de retirada dos embalados nas descargas é similar ao carregamento do material.



FIGURA 3.2 – Operação de carga dos embalados

3.1 Doses resultantes nas operações de carga ou de descarga

Como nas operações de carga e de descarga, o trabalhador retira os embalados da pilha a ser carregada e os acondiciona no compartimento de carga do veículo, considera-se que a taxa de dose no trabalhador ($\mu\text{Sv/h}$), resultante da exposição frontal a cada pilha é dada pela equação (2), substituindo-se o número de colunas no arranjo pela metade de seu valor.

$$\dot{D}_{tp} = 10 \cdot \text{It} \cdot (1 + r_e)^2 \cdot \sum_{k=1}^{nz} \sum_{j=1}^{ny/2} \sum_{i=1}^{nx} \frac{e^{-\left(\frac{ny}{2} - j\right) \cdot (\mu_{en} \cdot x)_{emb}}}{d_{ijk}^2} \quad (\mu\text{Sv/h}) \quad (3)$$

Onde:

\dot{D}_{tp} é a taxa de dose no trabalhador durante a carga, em $\mu\text{Sv/h}$;

d_{ijk} é a distância entre o trabalhador e as pilhas de embalados, em m.

Neste modelo, em média o trabalhador se mantém nas coordenadas:

$$x = nx \cdot r_e$$

$$y = y_{pilha} + 2 \cdot ny \cdot r_e$$

$$z = nz \cdot h,$$

onde y_{pilha} é a distância em que o trabalhador se mantém da pilha enquanto retira o embalado dela para levá-lo até o veículo, medida ao longo do eixo y . Supostamente o arranjo de embalados a ser carregado é o mesmo arranjo dos embalados já carregados.

A taxa de dose no trabalhador ($\mu\text{Sv/h}$) resultante do manuseio dos n_e embalados, um a um, será:

$$\dot{D}_{te} = 10 \cdot \frac{\text{It} \cdot (1 + r_e)^2}{d_{ijk}^2} \cdot n_e \quad (\mu\text{Sv/h}) \quad (4)$$

onde d_{ijk} (m) é a distância a que o trabalhador se mantém do embalado.

As doses (μSv) no trabalhador durante as operações de carga (D_{tc}) e de descarga (D_{td}) são dadas por:

$$D_{tc} = (\dot{D}_{tp} \cdot ne + \dot{D}_{te}) \cdot t_c \cdot n_{vvtc} \quad (\mu\text{Sv})$$

$$D_{td} = (\dot{D}_{tp} \cdot ne + \dot{D}_{te}) \cdot t_d \cdot n_{vvtc} \quad (\mu\text{Sv})$$

onde:

t_c = tempo gasto na operação de carga de um embalado.

t_d = tempo gasto na operação de descarga de um embalado.

n_{vvtc} = número de viagens realizadas pelo meio de transporte, por ano.

Se o número de trabalhadores envolvidos na operação for n_{tc} (carga) e n_{td} (descarga) e havendo n_{ttc} trabalhadores disponíveis para carga e n_{ttd} trabalhadores disponíveis para descarga, as doses individuais médias (μSv) em todas as operações de carga e descarga serão dadas por:

$$D_{imc} = \frac{(\dot{D}_{tp} \cdot ne + \dot{D}_{te}) \cdot t_c \cdot n_{vvtc} \cdot n_{tc}}{n_{ttc}} \quad (\mu\text{Sv}) \quad (5)$$

$$D_{imd} = \frac{(\dot{D}_{tp} \cdot ne + \dot{D}_{te}) \cdot t_d \cdot n_{vvtc} \cdot n_{td}}{n_{ttd}} \quad (\mu\text{Sv}) \quad (6)$$

onde:

D_{imc} é a dose média do trabalhador nas operações de cargas; e

D_{imd} é a dose média do trabalhador nas operações de descargas.

3.2 Dose no trabalhador (motorista) do meio de transporte

A taxa de dose ($\mu\text{Sv/h}$) recebida por um trabalhador (motorista) é dada por:

$$\dot{D}_m = 10 \cdot \text{It} \cdot (1 + r_e)^2 \cdot \sum_{k=1}^{nz} \sum_{j=1}^{ny} \sum_{i=1}^{nx} \frac{e^{-(ny-j) \cdot (\mu_{en} \cdot x)_{emb}}}{d_{ijk}^2} \quad (\mu\text{Sv/h}) \quad (7)$$

Em cada viagem existe n_{tv} trabalhadores e para as n_{vvt} viagens existem n_{ttv} trabalhadores disponíveis. Assim, a dose individual média D_{imm} , em μSv , recebida pelos trabalhadores (motoristas) será:

$$D_{imm} = \frac{\dot{D}_m \cdot L \cdot n_{vvt} \cdot n_{tv}}{v_m \cdot n_{ttv}} \quad (\mu\text{Sv}) \quad (8)$$

No modelo proposto, as coordenadas do motorista são:

$$x_m = r_e$$

$$y_m = d_{cab} + 2 n_y r_e$$

$$z_m = h$$

onde d_{cab} é a distância entre a posição do trabalhador (motorista) e a superfície do primeiro embalado, medida ao longo do eixo y .

3.3 Doses no público residente ao longo do percurso

No modelo utilizado neste trabalho, a população se distribui ao longo da estrada (eixo y) e as distâncias, em média, variam entre x_{\min} (m) e x_{\max} (m), medidas ao longo do eixo x , Figura 3.3.

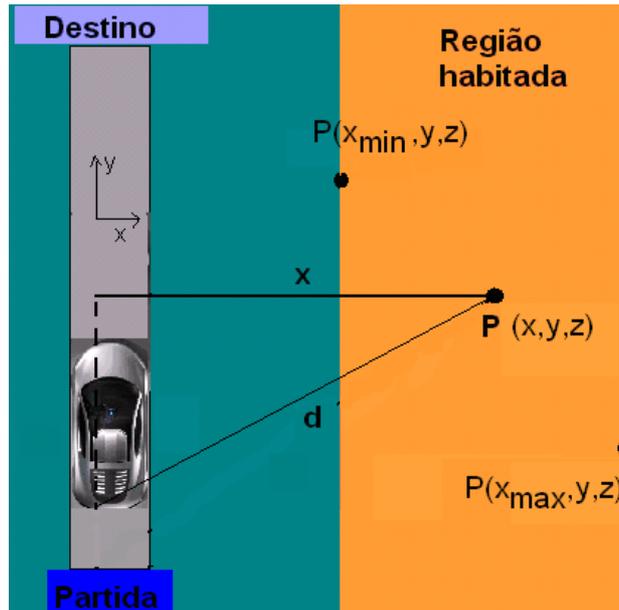


FIGURA 3.3 – Posicionamento do meio de transporte na via e distribuição da população

A taxa de dose \dot{D}_{lat} ($\mu\text{Sv/h}$) em um ponto P_{lat} situado na parede externa lateral do meio de transporte será dada por:

$$\dot{D}_{\text{lat}} = 10 \cdot \text{It} \cdot (1 + r_e)^2 \cdot \sum_{k=1}^{nz} \cdot \sum_{j=1}^{ny} \sum_{i=1}^{nx} \frac{e^{-(nx-i) \cdot (\mu_{\text{en}} \cdot x)_{\text{emb}}}}{d_{ijk}^2} \quad (\mu\text{Sv/h}) \quad (9)$$

Para esse cálculo, a localização do ponto lateral (que é arbitrário) é:

$$x_{\text{lat}} = 2 \cdot nx \cdot r_e + 0.5$$

$$y_{\text{lat}} = ny \cdot r_e$$

$$z_{\text{lat}} = h$$

A distância em um determinado instante t , entre um ponto $P(x,y,z)$ qualquer localizado na região habitada e o veículo, varia com a distância percorrida pelo veículo. O indivíduo do público pode estar totalmente exposto (por exemplo, em um ponto de ônibus na zona urbana) como também pode estar muito bem protegido por colinas ou construções. A situação onde um indivíduo receberá a maior dose será aquela em que o indivíduo se encontra totalmente exposto ao material radioativo que está sendo transportado.

Conhecendo-se a taxa de dose a uma distância d da fonte, a taxa de dose em um ponto $P_i(x_i, y_i, z_i)$ é dada por:

$$\dot{D}(x_i, y_i, z_i, t) = \dot{D} \cdot d^2 \cdot \frac{1}{d_i^2} \cdot e^{-\mu_{\text{en, ar}} \cdot d_{\text{ar}}} \quad (\mu\text{Sv/h})$$

onde:

d_{ar} é a espessura de ar entre o ponto P e o veículo e varia com a distância percorrida pelo veículo. Para as energias consideradas, a absorção de energia no ar a 100 m é da ordem de 1%. Por esse motivo, essa absorção (incluindo seu build up) pode ser desprezada;

\dot{D} é a taxa de dose em um ponto de referência $P(x,y,z)$ e d é a distância para o qual \dot{D} foi calculada. Nesse cálculo será utilizada a taxa de dose no ponto lateral ou a taxa de dose na cabine do motorista, sendo escolhida a taxa de dose de maior valor.

À medida que o veículo se move, a distância entre P_i e o meio de transporte varia de acordo com a Figura 3.4:

$$d_i^2 = x_i^2 + (y_i - v_m t)^2 + z_i^2$$

e

$$d^2 = x^2 + y^2 + z^2$$

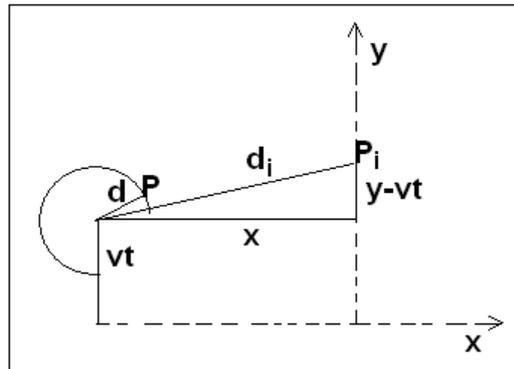


FIGURA 3.4 - Localização do ponto referencial e do indivíduo do público.

Para o cálculo das doses, foram adotadas algumas condições:

- A população se distribui de forma homogênea ao longo da via de transporte, com densidade populacional ρ (habitantes/m²), no espaço compreendido entre $y = 0$ e $y = L$ e $x = x_{\min}$ e $x = x_{\max}$;
- O percurso é uma reta;
- $z_i = 0$ (a dose é calculada no nível do piso do compartimento de carga do meio de transporte).

Sob estas condições, a dose individual (para um indivíduo localizado em x , y e z , após n_{vte} viagens do veículo de transporte) é dada por:

$$D_i(x, y) = \frac{D \cdot d^2 \cdot n_{\text{vte}}}{v_m^2} \int_{t=0}^{t=L/v_m} \frac{dt}{t^2 - p \cdot t + q} \quad (\mu\text{Sv})$$

$$p = \frac{2y}{v_m}$$

$$q = \frac{x^2 + y^2}{v_m^2}$$

Efetuada-se a integração, tem-se:

$$Di(x, y) = \frac{\dot{D} \cdot d^2 \cdot n_{vte}}{x \cdot v_m} \left[\arctg\left(\frac{L-y}{x}\right) + \arctg\left(\frac{y}{x}\right) \right] \quad (\mu Sv)$$

onde os valores dos arcos tangentes são dados em radianos.

Para qualquer valor de x , os valores da soma dos arcotangentes aumentam com y até a metade do percurso e então passam a diminuir. Para qualquer valor de y , $Di(x,y)$ aumenta quando x diminui.

Quando $y = \frac{L}{2}$ e $x = x_{min}$, a dose individual será máxima.

Quando $x = x_{max}$ e $y = 0$ ou $y = L$, a dose será mínima.

$$Di_{min} = \frac{\dot{D} \cdot d^2 \cdot n_{vte}}{x_{max} \cdot v_m} \arctg\left(\frac{L}{x_{max}}\right) \quad (\mu Sv)$$

$$Di_{max} = \frac{2 \cdot \dot{D} \cdot d^2 \cdot n_{vte}}{x_{min} \cdot v_m} \arctg\left(\frac{L}{2 \cdot x_{min}}\right) \quad (\mu Sv)$$

No limite $L \gg x_{max}$ e $L \gg 2 \cdot x_{min}$, $\arctg\left(\frac{L}{2 \cdot x_{min}}\right) \approx \arctg\left(\frac{L}{x_{max}}\right) \approx \frac{\pi}{2}$.

Essa aproximação implica em grandes distâncias percorridas e maiores tempos de exposição e/ou proximidades da via de transporte onde a dose é maior. As distâncias percorridas são da ordem de km e as distâncias entre o público e as vias de transporte são da ordem de m. Portanto a aproximação é aplicável.

Dessa forma:

$$Di_{\min} = Dc(x_{\max}, 0) = Dc(x_{\max}, L) = \frac{\pi \cdot \dot{D} \cdot d^2 \cdot n_{\text{vvte}}}{2 \cdot x_{\max} \cdot v_m} \quad (\mu\text{Sv}) \quad (10)$$

$$Di_{\max} = Dc(x_{\min}, \frac{L}{2}) = \frac{\pi \cdot \dot{D} \cdot d^2 \cdot n_{\text{vvte}}}{x_{\min} \cdot v_m} \quad (\mu\text{Sv}) \quad (11)$$

As doses coletivas correspondem às doses individuais multiplicadas pelo número de habitantes da região considerada. Admitindo haver simetria entre os dois lados da via de transporte, para uma distância L percorrida em linha reta, a dose coletiva será dada por:

$$Dc = \frac{\dot{D} \cdot d^2 \cdot 2 \cdot \rho \cdot n_{\text{vvte}}}{v_m} \int_{x=x_{\min}}^{x=x_{\max}} \frac{1}{x} \int_{y=0}^{y=L} \left[\arctg\left(\frac{L-y}{x}\right) + \arctg\left(\frac{y}{x}\right) \right] dy \cdot dx \quad (\mu\text{Sv})$$

$$Dc = \frac{2 \cdot \dot{D} \cdot d^2 \cdot \rho \cdot n_{\text{vvte}}}{v_m} \int_{x=x_{\min}}^{x=x_{\max}} \left[\frac{L}{x} \arctg\left(\frac{L}{x}\right) - \frac{1}{2} \ln\left(1 + \frac{L^2}{x^2}\right) \right] dx \quad (\mu\text{Sv}) \quad (12)$$

A dose média individual será dada por:

$$Dim = \frac{Dc}{2 \cdot \rho \cdot L \cdot (x_{\max} - x_{\min})} \quad (\mu\text{Sv}) \quad (13)$$

As doses coletivas máximas e mínimas serão:

$$Dc_{\min} = \frac{\pi \cdot \dot{D} \cdot d^2 \cdot n_{\text{vvte}} \cdot \rho \cdot L \cdot (x_{\max} - x_{\min})}{x_{\max} \cdot v_m} \quad (\mu\text{Sv}) \quad (14)$$

$$Dc_{\max} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \dot{D} \cdot d^2 \cdot n_{\text{vvte}} \cdot \rho \cdot L \cdot (x_{\max} - x_{\min})}{x_{\min} \cdot v_m} \quad (\mu\text{Sv}) \quad (15)$$

O percurso na realidade não é uma linha reta. Entretanto, as doses diminuem com o inverso do quadrado da distância e apenas pequenas distâncias entre o público e o veículo contribuem para a dose. Dessa forma, a integral em y é uma boa aproximação da somatória de pequenas distâncias percorridas pelo veículo em linha reta.

3.4 Doses nas pessoas dos veículos que transitam no mesmo sentido que o meio de transporte

A situação mais crítica é aquela onde se admite que os veículos do público acompanham o meio de transporte ao longo de todo o seu percurso, mantendo a mesma distância em relação ao meio de transporte, durante todo o tempo.

Nesse caso:

$$\frac{dDi}{dy} = \frac{\dot{D} \cdot d^2 \cdot t}{x_p^2 + y^2} = \frac{\dot{D} \cdot d^2}{x_p^2 + y^2} \cdot \frac{L}{v_m} \quad (\mu Sv)$$

onde:

x_p é a distância entre o meio de transporte e o veículo do público, medida ao longo do eixo x ;

y é a distância entre o meio de transporte e o veículo do público, medida ao longo do eixo y .

Para a mesma pista: $x_p = 0$ e $y = y_{\min}$, a dose individual máxima para o público e para a mesma pista, será:

$$Dims_{mp_{\max}} = \frac{\dot{D} \cdot d^2 \cdot L}{v_m \cdot y_{\min}^2} \quad (\mu Sv) \quad (16)$$

Para uma pista paralela, $y_{\min} = 0$, a dose individual máxima para o público, para uma pista paralela, será:

$$Dims_{pp_{\max}} = \frac{\dot{D} \cdot d^2 \cdot L}{v_m \cdot x_p^2} \quad (\mu Sv) \quad (17)$$

A dose coletiva nas pessoas será dada por:

$$D_{cms} = \dot{D} \cdot d^2 \cdot \rho_{ms} \cdot t \cdot \int_{y_{\min}}^L \frac{dy}{x_p^2 + y^2} = \dot{D} \cdot d^2 \cdot \rho_{ms} \cdot \frac{L}{v_m} \int_{y_{\min}}^L \frac{dy}{x_p^2 + y^2} \quad (\mu Sv)$$

onde ρ_{ms} é a densidade (pessoas no veículos que transitam próximo ao meio de transporte/unidade de comprimento da estrada).

A dose coletiva, para a mesma pista do meio de transporte, será:

Como $x_p = 0$,

$$D_{cms} = \dot{D} \cdot d^2 \cdot \rho_{ms} \cdot t \cdot \int_{y_{\min}}^L \frac{dy}{x_p^2 + y^2} = \dot{D} \cdot d^2 \cdot \rho_{ms} \cdot \frac{L}{v_m} \int_{y_{\min}}^L \frac{dy}{y^2} \quad (\mu Sv)$$

Efetuando-se a integração, tem-se:

$$D_{cms_{mp}} = \dot{D} \cdot d^2 \cdot \rho_{ms} \cdot \frac{L}{v_m} \left(\frac{1}{y_{\min}} - \frac{1}{L} \right) \quad (\mu Sv) \quad (18)$$

A dose coletiva para uma pista paralela será:

Neste caso $x_p \neq 0$,

$$D_{cms_{pp}} = \dot{D} \cdot d^2 \cdot \rho_{ms} \cdot \frac{L}{v_m} \int_0^L \frac{dy}{x_p^2 + y^2} = \frac{\dot{D} \cdot d^2 \cdot \rho_{ms} \cdot L}{x_p \cdot v_m} \arctg\left(\frac{L}{x_p}\right) \quad (\mu Sv) \quad (19)$$

Se cada veículo ocupa em média um espaço igual y_{\min} somado ao comprimento médio de um veículo ($comp_veículo$), o número total de veículos será:

$$n_{vms} = \frac{L}{comp_veículo + y_{\min}}$$

Quando o meio de transporte entra na via, todos os veículos estarão ao seu lado ou a sua frente. Quando o veículo mais distante sai da zona considerada, um veículo entra no início do percurso. Se cada veículo transporta n_{pvms} pessoas, a densidade de pessoas será:

$$\rho_{ms} = \frac{2.n_{pvms}}{\text{comp_veículo} + y_{\min}} \quad (20)$$

O número total de pessoas envolvidos, em cada pista, será

$$n_{pvms} = \rho_{ms} \cdot L \quad (21)$$

Para uma pista central (por onde circula o meio de transporte) e duas pistas paralelas, a dose individual média será:

$$Dim_{\text{tres_pistas}} = \frac{Dms_{mp} + 2.Dms_{pp}}{3 \cdot \rho_{ms} \cdot L} \quad (\mu Sv) \quad (22)$$

3.5 Doses nas pessoas dos veículos que transitam no sentido oposto

Neste caso as doses dependem do tempo e da posição dos veículos em relação ao veículo transportador. A distância instantânea, entre um veículo na pista de sentido oposto e o veículo de transporte, admitindo-se que os veículos do sentido oposto trafeguem à mesma velocidade que o veículo transportador, é dada por:

$$d(x_p, y, t) = x^2 + (y - 2 \cdot v_m \cdot t)^2 \quad (m)$$

A taxa de dose individual será dada por:

$$\frac{Diso(x_p, y, t)}{dy \cdot dt} = \frac{D \cdot d^2}{4 \cdot v_m^2} \cdot \frac{1}{t^2 - p \cdot t + q} \quad (\mu Sv/h)$$

$$\text{onde: } p = \frac{y}{v_m} \quad q = \frac{x^2 + y^2}{4.v_m^2}$$

A dose individual será dada por:

$$Di(x_p, y) = \frac{\dot{D}.d^2}{4.v_m^2} \int_{t=0}^{t=L/v_m} \frac{dt.dy}{t^2 - p.t + q} = \frac{\dot{D}.d^2}{2.v_m^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{4q - p^2}} \arctg\left(\frac{2t - p}{\sqrt{4q - p^2}}\right) (\mu\text{Sv})$$

Efetuando-se a integral, tem-se:

$$Di(x_p, y) = \frac{\dot{D}.d^2}{2.x_p.v_m} \left[\arctg\left(\frac{2.L - y}{x_p}\right) + \arctg\left(\frac{y}{x_p}\right) \right] (\mu\text{Sv}) \quad (23)$$

Para qualquer pista, a dose individual é máxima para quando $y = L$, isto é, para as pessoas dos veículos que se encontram no extremo oposto da via no momento em que o meio de transporte entra em sua via.

A estimativa da dose coletiva (D_{cso}) para a distância L percorrida em linha reta será:

$$D_{cso} = \frac{\dot{D}.d^2}{2.x_p.v_m} \int_{y=0}^{y=L} \left[\arctg\left(\frac{2.L - y}{x_p}\right) + \arctg\left(\frac{y}{x_p}\right) \right] dy$$

Efetuando-se a integral, tem-se:

$$D_{cso} = \frac{\dot{D}.d^2.p_{so}}{2.x_p.v_m} \left[2.L.\arctg\left(\frac{2.L}{x_p}\right) - \frac{x_p}{2} \ln\left(1 + \frac{4.L^2}{x_p^2}\right) \right] (\mu\text{Sv}) \quad (24)$$

O número de pessoas envolvidas, para cada pista paralela, será:

$$n_{pvso} = 2.L.p_{so}$$

4. IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO E SUAS INCERTEZAS

4.1 Implementação do modelo

Neste capítulo serão descritas as condições consideradas para a implementação do modelo matemático e as considerações sobre incertezas. Apresenta-se no Anexo a listagem do programa desenvolvido para realização dos cálculos.

4.1.1 Escolha do ponto lateral

O transporte de embalados contendo radiofármacos é feito em diferentes arranjos. A dose no trabalhador que conduz o meio de transporte e a dose durante a operação de carga e descarga aumenta com o número de empilhamento dos embalados e com o número de embalados na fileira (direção x), isto é, com o número de embalados não blindados por outros embalados.

Para o público residente, a dose aumenta com o número de embalados nas colunas (direção y). Para os veículos que transitam na mesma pista, no mesmo sentido que o meio de transporte, a dose será maior se houver um maior número de embalados arranjados em linha.

As doses máximas no público foram calculadas utilizando a maior dose na lateral do meio de transporte ou substituindo-se o ponto lateral pela cabine quando a dose na cabine for maior do que a dose no ponto lateral, em função do arranjo de embalados.

4.1.2 Número de pistas

Na região urbana de São Paulo, as vias geralmente apresentam quatro pistas em cada sentido (vias para até quatro carros em paralelo). Geralmente uma das vias é utilizada como estacionamento e os veículos estacionados estão sem as pessoas. As vias de sentido oposto são normalmente separadas das vias de mesmo sentido, por pelo menos um quarteirão quando estas vias são ruas. As avenidas urbanas geralmente possuem quatro pistas, duas em cada sentido.

Considera-se que na região urbana de São Paulo, o meio de transporte transita na pista do meio, em vias de três pistas no mesmo sentido, enquanto que no sentido oposto transitam veículos do público em vias de duas pistas.

Na região suburbana, geralmente existem quatro pistas. Nas vias expressas, como as marginais, temos seis pistas em cada sentido, separadas pelos rios. O tempo de permanência dos meios de transporte nessas vias é pequeno.

Para a região suburbana, considera-se que existem duas pistas para o público que trafega no mesmo sentido que o meio de transporte e duas pistas para o tráfego no sentido oposto.

Na região rural, os meios de transporte utilizam rodovias de quatro pistas, duas pistas em cada sentido.

Nas regiões urbanas e suburbanas de Minas Gerais e Rio de Janeiro considera-se que há trânsito em vias de duas pistas no mesmo sentido e duas vias no sentido oposto.

4.1.3 Coeficiente de absorção de energia dos embalados

Dentro dos embalados, as fontes são acomodadas em blindagens de chumbo. Os embalados contendo ^{131}I e ^{99}Mo são transportados juntos. A recomendação dada para o arranjo da carga é que ela fique disposta de forma que os embalados com menores índices de transporte ocupem as posições mais próximas da cabine, ou seja, para que a dose na posição do condutor do veículo seja a menor possível. Nem todos os embalados são transportados até o final do percurso. Alguns são entregues a destinatários localizados em alguns pontos ao longo do percurso. Estes embalados, geralmente, ocupam as posições mais próximas à porta do compartimento de carga, independentemente do valor do seu índice de transporte. Dessa forma, as posições dos embalados não podem ser pré-definidas em função, apenas dos tipos de radiofármacos ou dos índices de transporte dos embalados.

A quantidade $(\mu.x)_{\text{emb}}$ utilizada representa a combinação do embalado com a blindagem da fonte.

4.1.4 Ajustes do número de embalados

Os embalados são arranjados no compartimento de carga ocupando primeiro as posições das “linhas” (eixo x) e depois as posições da pilha (eixo z), n representa o número de fileiras, pilhas e colunas, e ne representa o número total de embalados. O número de embalados nas “colunas” (eixo y) é ajustado de acordo com:

$$n_y = \text{parte inteira de } \frac{n_e}{n_z \cdot n_x}$$

mas se $n_y \cdot n_x \cdot n_z < n_e$ então $n_y = n_y + 1$.

Por exemplo, considerando um total de 37 embalados dentro do meio de transporte, com um arranjo $n_z = 2$, $n_x = 5$, tem-se $n_y = 4$. O cálculo é feito como se existissem quarenta embalados no veículo, ou seja, o número de embalados para efeitos de cálculos foi ajustado em quarenta.

4.1.5 Considerações do modelo matemático

A modelagem matemática desenvolvida tinha como objetivo inicial possibilitar os cálculos das doses nos indivíduos do público, pois as doses recebidas pelos trabalhadores são determinadas por meio do monitoramento de cada trabalhador, em cada operação de carregamento dos embalados. Foi considerado que as doses no carregamento são iguais às doses no descarregamento. As taxas de doses nas cabines dos meios de transporte também são determinadas por meio de monitoramento.

Assim sendo, só haveria necessidade de se utilizar a modelagem matemática para calcular as doses dos indivíduos do público. No entanto, foi decidido utilizar a modelagem matemática para calcular também as doses nos trabalhadores para que seja feita uma comparação entre as doses calculadas resultantes das medidas dos monitoramentos e as calculadas pelo modelo matemático utilizado, de forma a se poder fazer sua validação.

4.2 Tratamento de incertezas

Os coeficientes de absorção de energia foram ajustados de forma a reproduzir a taxa de dose média experimental medidas na cabine do meio de transporte. Adotou-se, para as taxas de dose calculadas na cabine do meio de transporte e no ponto lateral, a mesma incerteza percentual obtida para a taxa de dose experimental na cabine do meio de transporte.

Para se obter a taxa de dose média medida experimentalmente, as medidas realizadas na cabine do meio de transporte foram determinadas por viagem e somadas, em seguida o resultado foi dividido pelo número de viagens (\dot{D}_i , $i = 1, 2, \dots, \text{nvte}$). Dessa forma, a taxa de dose média, $\dot{D}_{\text{média}}$, e sua variância σ^2 são dadas por:

$$\dot{D}_{\text{média}} = \frac{\sum_i \dot{D}_i}{\text{nvte}} \quad \sigma^2 = \frac{\sum_i \left(\dot{D}_i - \dot{D}_{\text{média}} \right)^2}{\text{nvte} \cdot (\text{nvte} - 1)}$$

Para o índice de transporte total (Itt), por viagem, foi dado igual tratamento.

As outras incertezas experimentais utilizadas no modelo são dadas na Tabela 4.1.

TABELA 4.1 - Incertezas experimentais utilizadas no modelo.

Parâmetro	Incerteza
Posicionamento do detector na determinação de It	$\pm 0,10$ m
Raio do embalado	$\pm 0,02$ m
Tempo de viagem e de manipulação de embalados	$\pm 10\%$

As incertezas dadas na Tabela 4.1 foram utilizadas para estimar as incertezas das doses calculadas pelo modelo. De um modo geral, se uma função F depende dos parâmetros independentes x_1, \dots, x_n , então a variância de F é dada por:

$$\sigma^2(F) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial x_i} \right)^2 \sigma^2(x_i) \quad (25)$$

O desvio padrão corresponde à raiz quadrada da variância.

4.2.1 Variâncias nas doses individuais resultantes das operações de carga e descarga

Para se determinar a variância nas doses individuais resultantes das operações de carga e descarga, foram utilizadas as equações (3), (4) e (5). Reescrevendo a equação (3) tem-se:

$$\dot{D}_{tp} = a \cdot It \cdot (x_m + r_e)^2$$

onde x_m é a distância onde é realizada a medida de It ($x = 1$ m), e

$$a = 10 \cdot \sum_{k=1}^{nz} \cdot \sum_{j=1}^{ny/2} \sum_{i=1}^{nx} \frac{e^{-\left(\frac{ny}{2}-j\right) \cdot (\mu \cdot x_b)_{emb}}}{d_{ijk}^2}$$

$$\frac{\partial \dot{D}_{tp}}{\partial It} = (x + r_e)^2 \cdot a \quad \frac{\partial \dot{D}_{tp}}{\partial r_e} = \frac{\partial \dot{D}_{tp}}{\partial x} = 2 \cdot It \cdot a \cdot (x + r_e)$$

$$\sigma^2(\dot{D}_{tp}) = a^2 \cdot (x + r_e)^2 \cdot \left\{ [(x + r_e) \cdot \sigma(It)]^2 + 4 \cdot It^2 \cdot [\sigma^2(x) + \sigma^2(r_e)] \right\} \quad (26)$$

Reescrevendo a equação (4) tem-se:

$$\dot{D}_{te} = b \cdot It \cdot (x + r_e)^2$$

$$\text{onde } b = \frac{10 \cdot n_e}{d_{ijk}^2}$$

$$\frac{\partial \dot{D}_{te}}{\partial It} = (x + r_e)^2 \cdot b \quad \frac{\partial \dot{D}_{te}}{\partial r_e} = \frac{\partial \dot{D}_{te}}{\partial x} = 2 \cdot It \cdot b \cdot (x + r_e)$$

$$\sigma^2(\dot{D}_{te}) = b^2 \cdot (x + r_e)^2 \cdot \left\{ [(x + r_e) \cdot \sigma(It)]^2 + 4 \cdot It^2 \cdot [\sigma^2(x) + \sigma^2(r_e)] \right\} \quad (27)$$

Reescrevendo a equação (5) tem-se:

$$D_{imc} = c \cdot (\dot{D}_{tp} + \dot{D}_{te}) \cdot t_c$$

$$c = \frac{n_{vte} \cdot n_{tc}}{n_{ttc}}$$

$$\frac{\partial \dot{D}_{imc}}{\partial \dot{D}_{tp}} = \frac{\partial \dot{D}_{imc}}{\partial \dot{D}_{te}} = c \cdot t_c \quad \frac{\partial \dot{D}_{imc}}{\partial t_c} = c \cdot (\dot{D}_{tp} + \dot{D}_{te})$$

$$\sigma^2(D_{imc}) = c^2 \cdot t_c^2 \cdot \left[\sigma^2(\dot{D}_{tp} \cdot ne) + \sigma^2(\dot{D}_{te}) \right] + \left[c \cdot (\dot{D}_{tp} \cdot ne + \dot{D}_{te}) \cdot \sigma(t_c) \right]^2 \quad (28)$$

A variância de D_{imd} é calculada substituindo-se t_c por t_d .

4.2.2 Variância nas dose das pessoas do meio de transporte

$$\sigma^2(D_{imm}) = D_{imm}^2 \left[\sigma^2(\dot{D}_m) + \sigma^2(t) \right] \quad (29)$$

onde $\sigma^2(\dot{D}_m)$ e $\sigma^2(t)$ são variâncias percentuais experimentais.

4.2.3 Variância no ponto lateral

Para o cálculo da dose no indivíduo do público foi considerada a maior taxa de dose entre a calculada para a cabine do meio de transporte e a calculada em um ponto lateral no meio de transporte. A partir desse valor maior, foi definido o produto $\dot{D}.d^2$, utilizado nas projeções para as doses nos indivíduos do público.

Para o produto $\dot{D}.d^2$ adotou-se a mesma variância percentual (variância percentual experimental) adotada para a taxa de dose na cabine do veículo transportador.

4.2.4 Variâncias nas doses dos indivíduos do público

Todas as doses são diretamente proporcionais ao tempo de exposição e ao produto $\dot{D}.d^2$. A distribuição espacial dos indivíduos do público, residente e em trânsito, são parâmetros de um modelo que pretende reproduzir a exposição das pessoas. As doses foram calculadas de modo conservativo e a distribuição espacial supostamente não possui incertezas.

Se uma determinada dose D é proporcional a t e a $\dot{D}.d^2$, pode-se genericamente escrever: $D = \alpha.\dot{D}.d^2.t$, onde α é uma constante. Pela equação (25), a variância em D será dada por:

$$\sigma^2(D) = D^2 \cdot \left[\left(\frac{\sigma(\dot{D} \cdot d^2)}{\dot{D} \cdot d^2} \right)^2 + \left[\left(\frac{\sigma(t)}{t} \right)^2 \right] \right]$$

Se uma dose D é o resultado da composição de uma dose D₁ e uma dose D₂:

$$D = \alpha_1 \cdot D_1 + \alpha_2 \cdot D_2,$$

Assim, a variância em D será dada por: $\sigma^2(D) = \alpha_1^2 \cdot \sigma^2(D_1) + \alpha_2^2 \cdot \sigma^2(D_2)$. Essas fórmulas de propagação de variância são as mesmas explicitadas no item 4.2.1.

4.2.5 Parâmetros considerados constantes

Os parâmetros considerados constantes utilizados no presente trabalho são apresentados na Tabela 4.2.

TABELA 4.2 - Parâmetros considerados constantes

Parâmetros	Símbolo	Valor
Distância média que o trabalhador mantém das pilhas de carga e descarga durante as operações de carga e descarga (eixo y).	ypilha	0,4 m
Distância média que o trabalhador mantém entre si e o embalado nas operações de carga e descarga (eixo y)	ymanuseio	0,5 m
Distância entre a primeira fileira de embalados e a posição do motorista na cabine (eixo y)	d _{cab}	0,5 m
Comprimento médio de um veículo	comp_veículo	5,0 m
Largura média das pistas	largura_da_pista	2,5 m

5. CÁLCULO DE DOSES

Para se obter uma avaliação precisa do impacto radiológico, em condições normais de transporte, resultante do transporte dos embalados contendo radiofármacos partindo do IPEN – CNEN/SP para os quatro principais destinos, foi necessário conhecer alguns parâmetros e definir outros:

- distância em km entre o IPEN – CNEN/SP e os destinos;
- percentagem da distância relativa a cada tipo de zona (rural, suburbana e urbana) percorrida pelo transporte;
- velocidade média do veículo nas diversas zonas;
- densidade demográfica de cada zona percorrida pelo transporte;
- número de veículos, por hora, que trafegam ao longo do percurso no mesmo sentido e no sentido contrário;
- número de trabalhadores envolvidos no transporte;
- quantidade de embalados transportados;
- índice de transporte médio da carga; e
- número médio de embalados por transporte.

Os resultados que são apresentados representam aqueles embalados com rótulos de categoria II-Amarela e III-Amarela, contendo geradores de tecnécio, ^{99m}Mo , e ^{131}I , que foram transportados a partir do IPEN – CNEN/SP durante o ano de 2008.

Neste período de amostragem foram transportados 29.825 embalados contendo ^{99m}Mo e ^{131}I para os quatros destinos: Aeroporto de Congonhas, em São Paulo; Aeroporto Internacional de Guarulhos (Cumbica), Cidades do Rio de Janeiro e Belo Horizonte.

Desses embalados transportados, 47,5 % dos embalados continham ^{99m}Mo e 52,5 % continham ^{131}I . Foram realizadas 1020 viagens, com a participação de 23 trabalhadores (IOEs), de seis empresas transportadoras.

Na Tabela 5.1, são apresentadas as principais informações, a partir dos valores medidos experimentalmente, referentes aos embalados transportados no ano de 2008, contendo ^{99m}Mo e ^{131}I .

TABELA 5.1 – Principais informações experimentais sobre os embalados transportados no ano de 2008

Número de embalados transportados com ^{99m}Mo e ^{131}I	29.825
Número médio de embalados por veículo	29
Número de viagens anuais	1020
Número de trabalhadores envolvidos (motoristas)	23
Dose média recebida pelos trabalhadores em cada operação de carga (μSv)	143,0
Dose média recebida pelos trabalhadores em cada operação de descarga (μSv)	143,0
IT total transportado	26.842
Média da \sum_{IT} por veículo	26,1
IT médio por embalado	0,9
Porcentagem de embalados com ^{99m}Mo	47,5
Porcentagem de embalados com ^{131}I	52,5

5.1 Doses medidas experimentalmente nos trabalhadores resultantes dos transportes de embalados para o Aeroporto de Congonhas

Durante o ano de 2008, foram transportados do IPEN – CNEN/SP para o Aeroporto de Congonhas a quantidade de 12.775 embalados em 365 viagens. Estiveram envolvidos oito trabalhadores, de duas empresas transportadoras.

Os trabalhadores envolvidos nas operações de carga e descarga dos embalados são os próprios motoristas, que além de conduzirem os meios de transporte, fazem também os carregamentos e descarregamentos dos embalados. Foi fornecido um dosímetro de leitura direta para cada trabalhador (motorista) e registrada sua leitura depois de finalizada cada

operação de carga. Foi considerado, para a execução deste trabalho, que as doses recebidas pelos trabalhadores nas operações de descarga são iguais às doses recebidas nas operações de carga.

Depois de finalizada cada operação de carga, foi realizado o monitoramento do meio de transporte e registrou-se a taxa de dose, em $\mu\text{Sv/h}$, medida na cabine do meio de transporte, que era a medida de interesse para este trabalho. As considerações feitas neste parágrafo e também no parágrafo anterior foram utilizadas para os demais destinos.

Na Tabela 5.2 são apresentadas as principais informações, a partir dos valores medidos experimentalmente, referentes aos embalados transportados do IPEN – CNEN/SP para o Aeroporto de Congonhas.

TABELA 5.2 – Principais informações experimentais sobre os embalados transportados até Congonhas

Embalados transportados	12.775
Número de viagens anuais	365
IT médio transportado por viagem	$29,3 \pm 8,1$
IT médio dos embalados	0,9
IT total transportado	11.498
Número médio de embalados por viagem	35
Número de trabalhadores envolvidos (motoristas)	8
Taxa de dose média na cabine ($\mu\text{Sv/h}$)	$97,8 \pm 59,1$
Dose média recebida pelos trabalhadores em cada operação de carga (μSv)	143,0
Dose média recebida pelos trabalhadores em cada operação de descarga (μSv)	143,0
Distância percorrida (km)	15
Tempo considerado (h)	1

Na Tabela 5.3 são apresentadas as doses anuais calculadas para os trabalhadores, a partir dos valores medidos experimentalmente e que estão descritos na Tabela 5.2 e outros dados importantes de interesse das empresas transportadoras.

TABELA 5.3 – Doses anuais calculadas, a partir dos valores medidos experimentalmente, resultantes dos embalados transportados até Congonhas e demais informações de interesse

Dose total recebida pelos trabalhadores nas operações de transporte (μSv)	35.697,0
Dose total recebida pelos trabalhadores nas operações de carga (μSv)	52.195,0
Dose total recebida pelos trabalhadores nas operações de descarga (μSv)	52.195,0
Dose total recebida pelos trabalhadores no transporte, carga e descarga (μSv)	140.087,0
Dose total média para cada trabalhador pelos transportes (μSv)	4.462,1
Dose total média para cada trabalhador pelas cargas (μSv)	6.524,4
Dose total média para cada trabalhador pelas descargas (μSv)	6.524,4
Dose total média para cada trabalhador pelos transportes, cargas e descargas (μSv)	17.510,9
Dose média no trabalhador por viagem (transporte, carga e descarga) (μSv)	384,0
Dose/IT (μSv)	12,2
Número médio de transporte por trabalhador (viagem, carga e descarga)	45,6
Número de viagens por trabalhador necessárias para alcançar o limite de dose anual médio estabelecido (20 mSv)	52,1
Número total de viagens necessárias para os oito trabalhadores alcançarem o limite de dose anual médio estabelecido(20 mSv)	417
Aumento percentual médio de viagens por ano que os oito trabalhadores podem executar sem alcançarem o limite de dose anual médio estabelecido (20 mSv)	14

5.2 Doses medidas experimentalmente nos trabalhadores resultantes dos transportes de embalados para o Aeroporto Internacional de Guarulhos (Cumbica)

Durante o ano de 2008, foram transportados do IPEN – CNEN/SP para o Aeroporto de Internacional de Guarulhos (Cumbica) a quantidade de 10.890 embalados em 330 viagens. Estiveram envolvidos oito trabalhadores, de duas empresas transportadoras.

Na Tabela 5.4 são apresentadas as principais informações, a partir dos valores medidos experimentalmente, referentes aos embalados transportados do IPEN – CNEN/SP para o Aeroporto de Cumbica.

TABELA 5.4 – Principais informações experimentais sobre os embalados transportados até Cumbica

Embalados transportados	10.890
Número de viagens anuais	330
IT médio transportado por viagem	$35,3 \pm 9,9$
IT médio dos embalados	0,9
IT total transportado	9.801
Número médio de embalados por viagem	33
Número de trabalhadores envolvidos (motoristas)	8
Taxa de dose média na cabine ($\mu\text{Sv/h}$)	$83,3 \pm 36,1$
Dose média recebida pelos trabalhadores em cada operação de carga (μSv)	143,0
Dose média recebida pelos trabalhadores em cada operação de descarga (μSv)	143,0
Distância percorrida (km)	40
Tempo considerado (h)	1,5

Na Tabela 5.5 são apresentadas as doses anuais calculadas para os trabalhadores, a partir dos valores medidos experimentalmente e que estão descritos na Tabela 5.4 e ainda outros dados importantes de interesse das empresas transportadoras.

TABELA 5.5 – Doses anuais calculadas, a partir dos valores medidos experimentalmente, resultantes dos embalados transportados até Cumbica e demais informações de interesse

Dose total recebida pelos trabalhadores nas operações de transporte (μSv)	41.233,5
Dose total recebida pelos trabalhadores nas operações de carga (μSv)	47.190,0
Dose total recebida pelos trabalhadores nas operações de descarga (μSv)	47.190,0
Dose total recebida pelos trabalhadores no transporte, carga e descarga (μSv)	135.613,5
Dose total média para cada trabalhador pelos transportes (μSv)	5.154,2
Dose total média para cada trabalhador pelas cargas (μSv)	5.898,8
Dose total média para cada trabalhador pelas descargas (μSv)	5.898,8
Dose total média para cada trabalhador pelos transportes, cargas e descargas (μSv)	16.951,8
Dose média no trabalhador por viagem (transporte, carga e descarga) (μSv)	411,0
Dose/IT (μSv)	13,8
Número médio de transporte por trabalhador (viagem, carga e descarga)	41,2
Número de viagens por trabalhador necessárias para alcançar o limite de dose anual médio estabelecido (20 mSv)	48,6
Número total de viagens necessárias para os oito trabalhadores alcançarem o limite de dose anual médio estabelecido (20 mSv)	389,4
Aumento percentual médio de viagens por ano que os oito trabalhadores podem executar sem alcançarem o limite de dose anual médio estabelecido (20 mSv)	18

5.3 Doses medidas experimentalmente nos trabalhadores resultantes dos transportes de embalados para a Cidade do Rio de Janeiro

Durante o ano de 2008, foram transportados do IPEN – CNEN/SP para a Cidade do Rio de Janeiro a quantidade de 4.819 embalados em 229 viagens. Estiveram envolvidos quatro trabalhadores, de três empresas transportadoras.

Na Tabela 5.6 são apresentadas as principais informações, a partir dos valores medidos experimentalmente, referentes aos embalados transportados do IPEN – CNEN/SP para a Cidade do Rio de Janeiro.

TABELA 5.6 – Principais informações experimentais sobre os embalados transportados até o Rio de Janeiro

Embalados transportados	4.819
Número de viagens anuais	229
IT médio transportado por viagem	19,2 ± 11,5
IT médio dos embalados	0,8
IT total transportado	3.856
Número médio de embalados por viagem	21
Número de trabalhadores envolvidos (motoristas)	4
Taxa de dose média na cabine (μSv/h)	64,8 ± 51,7
Dose média recebida pelos trabalhadores em cada operação de carga (μSv)	143,0
Dose média recebida pelos trabalhadores em cada operação de descarga (μSv)	143,0
Distância percorrida (km)	400
Tempo considerado (h)	4,5

Na Tabela 5.7 são apresentadas as doses anuais calculadas para os trabalhadores, a partir dos valores medidos experimentalmente e que estão descritos na Tabela 5.6 e outros dados importantes de interesse das empresas transportadoras.

TABELA 5.7 – Doses anuais calculadas, a partir dos valores medidos experimentalmente, resultantes dos embalados transportados até o Rio de Janeiro e demais informações de interesse

Dose total recebida pelos trabalhadores nas operações de transporte	66.776,4 μ Sv
Dose total recebida pelos trabalhadores nas operações de carga	32.747,0 μ Sv
Dose total recebida pelos trabalhadores nas operações de descarga	32.747,0 μ Sv
Dose total recebida pelos trabalhadores no transporte, carga e descarga	132.270,4 μ Sv
Dose total média para cada trabalhador pelos transportes	16.694,0 μ Sv
Dose total média para cada trabalhador pelas cargas	8.186,8 μ Sv
Dose total média para cada trabalhador pelas descargas	8.186,8 μ Sv
Dose total média para cada trabalhador pelos transportes, cargas e descargas	33.067,6 μ Sv
Dose média no trabalhador por viagem (transporte, carga e descarga)	577,6 (μ Sv)
Dose/IT	34,3 μ Sv
Número médio de transporte por trabalhador (viagem, carga e descarga)	57,2
Número de viagens por trabalhador necessárias para alcançar o limite de dose anual médio estabelecido (20 mSv)	34,6
Número total de viagens necessárias para os quatro trabalhadores alcançarem o limite de dose anual médio estabelecido (20 mSv)	138,5
Diminuição percentual médio de viagens por ano que os quatro trabalhadores podem executar sem alcançarem o limite de dose anual médio estabelecido (20 mSv)	39,5

5.4 Doses medidas experimentalmente nos trabalhadores resultantes dos transportes de embalados para a Cidade de Belo Horizonte

Durante o ano de 2008, foram transportados do IPEN – CNEN/SP para a Cidade de Belo Horizonte a quantidade de 1.341 embalados em 96 viagens. Estiveram envolvidos quatro trabalhadores, de uma empresa transportadora.

Na Tabela 5.8 são apresentadas as principais informações, a partir dos valores medidos experimentalmente, referentes aos embalados transportados do IPEN – CNEN/SP para a Cidade de Belo Horizonte.

TABELA 5.8 – Principais informações experimentais sobre os embalados transportados até Belo Horizonte

Embalados transportados	1.341
Número de viagens anuais	96
Número médio de embalados por viagem	14
IT médio transportado por viagem	$11,4 \pm 3,5$
IT médio dos embalados	0,9
IT total transportado	1.207
Número de trabalhadores envolvidos (motoristas)	3
Taxa de dose média na cabine ($\mu\text{Sv/h}$)	$76,7 \pm 30,1$
Dose média recebida pelos trabalhadores em cada operação de carga (μSv)	143,0
Dose média recebida pelos trabalhadores em cada operação de descarga (μSv)	143,0
Distância percorrida (km)	500
Tempo considerado (h)	6

Na Tabela 5.9 são apresentadas as doses anuais calculadas para os trabalhadores, a partir dos valores medidos experimentalmente e que estão descritos na Tabela 5.8 e outros dados importantes de interesse das empresas transportadoras.

TABELA 5.9 – Doses anuais calculadas, a partir dos valores medidos experimentalmente, resultantes dos embalados transportados até Belo Horizonte e demais informações de interesse

Dose total recebida pelos trabalhadores nas operações de transporte (μSv)	44.179,2
Dose total recebida pelos trabalhadores nas operações de carga (μSv)	13.728,0
Dose total recebida pelos trabalhadores nas operações de descarga (μSv)	13.728,0
Dose total recebida pelos trabalhadores no transporte, carga e descarga (μSv)	71.635,2
Dose total média para cada trabalhador pelos transportes (μSv)	14.726,4
Dose total média para cada trabalhador pelas cargas (μSv)	4.576,0
Dose total média para cada trabalhador pelas descargas (μSv)	4.576,0
Dose total média para cada trabalhador pelos transportes, cargas e descargas (μSv)	23.878,4
Dose média no trabalhador por cada operação de transporte, carga e descarga (μSv)	746,2
Dose/IT (μSv)	59,3
Número médio de transporte por trabalhador (viagem, carga e descarga)	32,0
Número de viagens por trabalhador necessárias para alcançar o limite de dose anual médio estabelecido	26,8
Número total de viagens necessárias para os três trabalhadores alcançarem o limite de dose anual médio estabelecido	80,4
Diminuição percentual médio de viagens por ano que os três trabalhadores podem executar sem alcançarem o limite de dose anual médio estabelecido	19,5

5.5 Doses anuais na população e nos trabalhadores resultantes dos transportes de embalados para o Aeroporto de Congonhas

Para os cálculos das doses recebidas pelos trabalhadores e pela população resultantes dos transportes dos 12.775 embalados, nas 365 viagens realizadas do IPEN – CNEN/SP até o Aeroporto de Congonhas, São Paulo, com a utilização do programa computacional foram utilizadas as informações constantes na tabela 5.10. Neste caso, não houve preocupação de arranjo da carga e não foi considerada a blindagem em virtude de vidros, ferragens e do banco da cabine do meio de transporte.

TABELA 5.10 – Informações utilizadas para os cálculos das doses recebidas pelos trabalhadores e pela população

n_x, n_y, n_z	Arranjo da carga (condição mais desfavorável)	4 x 5 x 2
r_e	Raio do embalado	0,15 m
h	Altura do embalado	0,4 m
μ_{en-X}	Espessura efetiva de blindagem de chumbo	5 cm
n_e	Número total de embalados por viagem	35
I_{tt}	IT médio transportado por viagem	29,3
n_{vte}	Número de viagens anuais	365
t_v	Tempo gasto em cada viagem	1 h
t_c/t_d	Tempo gasto em cada operação de carga/descarga	0,00694 h
n_{tc}/n_{td}	Número de trabalhadores em cada operação de carga/descarga	1
n_{ttc}/n_{ttd}	Número total de trabalhadores disponíveis para as operações de carga/descarga	8
y_{pilha}	Distância trabalhador-pilha (eixo y)	0,4 m
n_{tv}	Número de trabalhadores na condução de cada meio de transporte	1
n_{ttv}	Número total de trabalhadores na condução do meio de transporte	8
d_{total}	Distância percorrida	15.000 m
$comp_{veículo}$	Comprimento dos meios de transportes	5 m
$largura_{de}_{pista}$	Largura das pistas	2,5 m

Para classificação das zonas como urbana, suburbana e rural foi considerada a densidade demográfica nos respectivos trajetos. Nas tabelas 5.11 e 5.12 são mostradas as informações referentes às respectivas zonas.

TABELA 5.11 – Informações referentes à zona urbana

f	Fração da distância percorrida	10% (0,1)
vm	Velocidade média	15.000 m/h
dp	Densidade populacional da zona suburbana	0,08 hab/m ²
	População residente	960 pessoas
	População que trafega no mesmo sentido	5.400 pessoas
	População que trafega no sentido oposto	1.846 pessoas
x _{min}	Distância mínima indivíduo-meio de transporte	5 m
x _{max}	Distância máxima indivíduo - meio de transporte:	20 m
x _{pm}	Distância entre pistas no mesmo sentido	2.5 m
n _{prms}	Número de pessoas por veículo no mesmo sentido	2
n _{prso}	Número de pessoas por veiculo no sentido oposto	2
x _{po}	Distância entre pistas no sentido oposto	3 m

TABELA 5.12 – Informações referentes à zona suburbana

f	Fração da distância percorrida	90% (0,9)
vm	Velocidade média	15.000 m/h
dp	Densidade populacional da zona suburbana	0,008 hab/m ²
	População residente	3.240 pessoas
	População que trafega no mesmo sentido	5.400 pessoas
	População que trafega no sentido oposto	1.846 pessoas
x _{min}	Distância mínima indivíduo-meio de transporte	5 m
x _{max}	Distância máxima indivíduo - meio de transporte:	20 m
x _{pm}	Distância entre pistas no mesmo sentido	3 m
n _{prms}	Número de pessoas por veículo no mesmo sentido	2
n _{prso}	Número de pessoas por veiculo no sentido oposto	2
x _{po}	Distância entre pistas no sentido oposto	3 m

Informações referente à zona rural: Não existe neste percurso.

Na Tabela 5.13 são apresentados os valores de doses anuais calculadas para a população da Zona Urbana, no percurso IPEN – CNEN/SP - Aeroporto de Congonhas, São Paulo, com a utilização do programa computacional.

TABELA 5.13 – Doses anuais calculadas para a população da Zona Urbana

	População residente	População que trafega no mesmo sentido	População que trafega no sentido oposto
Dose individual mínima	$(5,04 \pm 0,72) \mu\text{Sv}$	NA	NA
Dose individual máxima	$(50,41 \pm 7,20) \mu\text{Sv}$	$(29,31 \pm 10,76) \mu\text{Sv}$	$(0,05 \pm 0,01) \mu\text{Sv}$
Dose individual média	$(10,06 \pm 1,43) \mu\text{Sv}$	$(0,03 \pm 0,01) \mu\text{Sv}$	$(0,04 \pm 0,01) \mu\text{Sv}$
Dose coletiva mínima	$(4,84 \pm 0,69) \text{mSv}$	NA	NA
Dose coletiva máxima	$(48,40 \pm 6,91) \text{mSv}$	NA	NA
Dose coletiva	$(9,66 \pm 1,38) \text{mSv}$	$(77,97 \pm 11,13) \mu\text{Sv}$	$(65,26 \pm 6,87) \mu\text{Sv}$

NA: não aplicável

Na Tabela 5.14 são apresentados os valores de doses anuais calculadas para a população da Zona Suburbana, no percurso IPEN – CNEN/SP Aeroporto de Congonhas, São Paulo, com a utilização do programa computacional.

TABELA 5.14 – Doses anuais calculadas para a população da Zona Suburbana

	População residente	População que trafega no mesmo sentido	População que trafega no sentido oposto
Dose individual mínima	$(1,26 \pm 0,18) \mu\text{Sv}$	NA	NA
Dose individual máxima	$(10,08 \pm 1,44) \mu\text{Sv}$	$(65,94 \pm 0,29) \mu\text{Sv}$	$(0,05 \pm 0,01) \mu\text{Sv}$
Dose individual média	$(2,32 \pm 0,33) \mu\text{Sv}$	$(0,02 \pm 0,01) \mu\text{Sv}$	$(0,04 \pm 0,01) \mu\text{Sv}$
Dose coletiva mínima	$(4,08 \pm 0,58) \text{mSv}$	NA	NA
Dose coletiva máxima	$(32,66 \pm 4,66) \text{mSv}$	NA	NA
Dose coletiva	$(7,51 \pm 1,07) \text{mSv}$	$(70,05 \pm 10,01) \mu\text{Sv}$	$(0,19 \pm 0,02) \text{mSv}$

NA: não aplicável

Na Tabela 5.15 são apresentadas a taxa de dose calculada na cabine do meio de transporte e as doses anuais calculadas para os trabalhadores envolvidos nas operações de condução do meio de transporte, carga e descarga, no percurso IPEN – CNEN/SP - Aeroporto de Congonhas, São Paulo, com a utilização do programa computacional.

Estas doses já foram calculadas utilizando as medidas dos monitoramentos dos trabalhadores, dos embalados e dos meios de transporte. O cálculo computacional é de grande importância para uma comparação com os valores medidos pelo monitoramento para propósitos de validação do modelo matemático.

TABELA 5.15 – Taxa de dose calculada na cabine e doses anuais calculadas para os trabalhadores

Taxa de dose média na cabine do meio de transporte ($\mu\text{Sv/h}$)	$132,78 \pm 13,54$
Dose total média para cada trabalhador nos transportes (mSv)	$6,06 \pm 0,86$
Dose total média para cada trabalhador pelas cargas (mSv)	$5,44 \pm 0,55$
Dose total média para cada trabalhador pelas descargas (mSv)	$5,44 \pm 0,55$
Dose total média para cada trabalhador pelos transportes, cargas e descargas (mSv)	$16,94 \pm 1,16$
Dose/IT (μSv)	$12,67 \pm 1,03$

5.6 Doses anuais na população e nos trabalhadores resultantes dos transportes de embalados para o Aeroporto de Congonhas utilizando um fator de absorção de energia para cabine do meio de transporte

Nesta condição, foi considerado um fator de absorção devido às condições determinadas para o arranjo das cargas, ou seja, os embalados de IT menores foram colocados próximos à cabine do meio de transporte, de forma a permitir que estes embalados servissem como blindagem para os embalados de IT maiores. Além disso, foram consideradas as blindagens dos materiais da cabine, como vidro e chapa de aço, que são utilizadas para fabricação da cabine.

As informações utilizadas para os cálculos das doses recebidas pelos trabalhadores e pela população resultantes dos transportes dos 12.775 embalados, nas 365 viagens realizadas do IPEN – CNEN/SP até o Aeroporto de Congonhas, São Paulo, com a utilização do programa computacional, foram as mesmas contidas no item 5.5 e o fator de absorção de energia considerado pela blindagem dos embalados de IT menores foi de 0,74.

As doses calculadas para a população nas zonas urbana e suburbana são iguais àquelas doses contidas nas Tabelas 5.13 e 5.14, ou seja, a introdução de blindagens na cabine não muda as doses na população. No entanto, as doses calculadas para o trabalhador que conduz o meio de transporte são sensivelmente diminuídas com a introdução de blindagens.

Na Tabela 5.16 são apresentadas a taxa de dose calculada na cabine do meio de transporte e as doses anuais calculadas para os trabalhadores envolvidos nas operações de condução do meio de transporte, carga e descarga, no percurso IPEN – CNEN/SP - Aeroporto de Congonhas, São Paulo, com a utilização do programa computacional e a consideração de um fator de absorção de energia de 0,74.

TABELA 5.16 – Taxa de dose calculada na cabine e doses anuais calculadas para os trabalhadores

Taxa de dose média na cabine do meio de transporte ($\mu\text{Sv/h}$)	$98,25 \pm 10,02$
Dose total média para cada trabalhador nos transportes (motorista) (mSv)	$4,482 \pm 0,64$
Dose total média para cada trabalhador pelas cargas (mSv)	$5,44 \pm 0,55$
Dose total média para cada trabalhador pelas descargas (mSv)	$5,44 \pm 0,55$
Dose total média para cada trabalhador pelos transportes, cargas e descargas (mSv)	$15,37 \pm 1,01$
Dose/IT (μSv)	$11,50 \pm 0,91$

5.7 Doses anuais na população e nos trabalhadores resultantes dos transportes de embalados para o Aeroporto Internacional de Guarulhos (Cumbica)

Para os cálculos das doses recebidas pelos trabalhadores e pela população resultantes dos transportes dos 10.890 embalados, nas 330 viagens realizadas do IPEN – CNEN/SP até o Aeroporto Internacional de Guarulhos (Cumbica), com a utilização do programa computacional foram utilizadas as informações constantes nas tabelas 5.17, 5.18 e 5.19. Neste caso, não houve preocupação de arranjo da carga e não foi considerada a blindagem em virtude de vidros, ferragens e do banco da cabine do meio de transporte.

TABELA 5.17 – Informações utilizadas para os cálculos das doses recebidas pelos trabalhadores e pela população

$n_x.n_y.n_z$	Arranjo da carga (condição mais desfavorável)	4 x 5 x 2
r_e	Raio do embalado	0,15 m
h	Altura do embalado	0,4 m
$\mu_{en}.X$	Espessura efetiva de blindagem de chumbo	5 cm
n_e	Número total de embalados por viagem	33
I_{tt}	IT médio transportado por viagem	35,3
n_{vte}	Número de viagens anuais	330
t_v	Tempo gasto em cada viagem	1,53 h
t_c/t_d	Tempo gasto em cada operação de carga/descarga	0,00694 h
n_{tc}/n_{td}	Número de trabalhadores em cada operação de carga/descarga	1
n_{ttc}/n_{ttd}	Número total de trabalhadores disponíveis para as operações de carga/descarga	8
y_{pilha}	Distância trabalhador-pilha (eixo y)	0,4 m
n_{tv}	Número de trabalhadores na condução de cada meio de transporte	1
n_{ttv}	Número total de trabalhadores na condução do meio de transporte	8

d _ total	Distância percorrida	40.000 m
comp _ veículo	Comprimento dos meios de transportes	5 m
largura _ de _ pista	Largura das pistas	2,5 m

Nas tabelas 5.18 e 5.19 são mostradas as informações referentes às respectivas zonas.

TABELA 5.18 – Informações referentes à zona urbana

f	Fração da distância percorrida	20% (0,2)
vm	Velocidade média	26.000 m/h
dp	Densidade populacional da zona suburbana	0,08 hab/m ²
	População residente	5.120 pessoas
	População que trafega no mesmo sentido	14.769 pessoas
	População que trafega no sentido oposto	9.846 pessoas
x _{min}	Distância mínima indivíduo-meio de transporte	1 m
x _{max}	Distância máxima indivíduo - meio de transporte:	5 m
x _{pm}	Distância entre pistas no mesmo sentido	2.5 m
n _{prms}	Número de pessoas por veículo no mesmo sentido	2
n _{prso}	Número de pessoas por veiculo no sentido oposto	2
x _{po}	Distância entre pistas no sentido oposto	3 m

TABELA 5.19 – Informações referentes à zona suburbana

f	Fração da distância percorrida	80% (0,8)
vm	Velocidade média	26.000 m/h
dp	Densidade populacional da zona suburbana	0,008 hab/m ²
	População residente	7.680 pessoas
	População que trafega no mesmo sentido	12.800 pessoas
	População que trafega no sentido oposto	12.800 pessoas
x _{min}	Distância mínima indivíduo-meio de transporte	5 m
x _{max}	Distância máxima indivíduo - meio de transporte:	20 m
x _{pm}	Distância entre pistas no mesmo sentido	3 m
n _{prms}	Número de pessoas por veículo no mesmo sentido	2
n _{prso}	Número de pessoas por veiculo no sentido oposto	2
x _{po}	Distância entre pistas no sentido oposto	3 m

Informações referente à zona rural: Não existe neste percurso.

Na Tabela 5.20 são apresentados os valores de doses anuais calculadas para a população da Zona Urbana, no percurso IPEN – CNEN/SP - Aeroporto Internacional de Guarulhos (Cumbica), com a utilização do programa computacional.

TABELA 5.20 – Doses anuais calculadas para a população da Zona Urbana

	População residente	População que trafega no mesmo sentido	População que trafega no sentido oposto
Dose individual mínima	$(3,36 \pm 0,48) \mu\text{Sv}$	NA	NA
Dose individual máxima	$(33,60 \pm 4,79) \mu\text{Sv}$	$(0,11 \pm 0,01) \text{mSv}$	$(0,03 \pm 0,01) \mu\text{Sv}$
Dose individual média	$(6,75 \pm 0,96) \mu\text{Sv}$	$(20,01 \pm 0,01) \text{nSv}$	$(30,01 \pm 0,01) \text{nSv}$
Dose coletiva mínima	$(17,20 \pm 2,46) \text{mSv}$	NA	NA
Dose coletiva máxima	$(172,03 \pm 24,57) \text{mSv}$	NA	NA
Dose coletiva	$(34,55 \pm 4,93) \text{mSv}$	$(0,31 \pm 0,04) \text{mSv}$	$(0,26 \pm 0,02) \text{mSv}$

NA: não aplicável

Na Tabela 5.21 são apresentados os valores de doses anuais calculadas para a população da Zona Suburbana, no percurso IPEN – CNEN/SP Aeroporto Internacional de Guarulhos (Cumbica), com a utilização do programa computacional.

TABELA 5.21 – Doses anuais calculadas para a população da Zona Suburbana

	População residente	População que trafega no mesmo sentido	População que trafega no sentido oposto
Dose individual mínima	$(0,84 \pm 0,11) \mu\text{Sv}$	NA	NA
Dose individual máxima	$(6,72 \pm 0,95) \mu\text{Sv}$	$(115,23 \pm 0,38) \mu\text{Sv}$	$(0,04 \pm 0,01) \mu\text{Sv}$
Dose individual média	$(1,55 \pm 0,22) \mu\text{Sv}$	$(10,01 \pm 0,01) \text{nSv}$	$(30,01 \pm 0,01) \text{nSv}$
Dose coletiva mínima	$(6,45 \pm 0,92) \text{mSv}$	NA	NA
Dose coletiva máxima	$(51,61 \pm 7,37) \text{mSv}$	NA	NA
Dose coletiva	$(11,90 \pm 1,70) \text{mSv}$	$(0,12 \pm 0,02) \text{mSv}$	$(0,34 \pm 0,04) \text{mSv}$

NA: não aplicável

Na Tabela 5.22 são apresentadas a taxa de dose média calculada na cabine do meio de transporte e as doses anuais calculadas para os trabalhadores envolvidos nas operações de condução do meio de transporte, carga e descarga, no percurso IPEN – CNEN/SP - Aeroporto Internacional de Guarulhos (Cumbica), com a utilização do programa computacional.

Embora estas doses já tenham sido calculadas utilizando as medidas dos monitoramentos dos trabalhadores, dos embalados e dos meios de transporte, estes cálculos são de grande importância para uma comparação entre os valores com propósitos de validação do modelo matemático.

TABELA 5.22 – Taxa de dose calculada na cabine e doses anuais calculadas para os trabalhadores

Taxa de dose média na cabine do meio de transporte ($\mu\text{Sv/h}$)	$169,66 \pm 17,31$
Dose total média para cada trabalhador nos transportes (motorista) (mSv)	$10,77 \pm 1,53$
Dose total média para cada trabalhador pelas cargas (mSv)	$5,93 \pm 0,59$
Dose total média para cada trabalhador pelas descargas (mSv)	$5,93 \pm 0,59$
Dose total média para cada trabalhador pelos transportes, cargas e descargas (mSv)	$22,63 \pm 1,76$
Dose/IT (μSv)	$15,54 \pm 1,33$

5.8 Doses anuais na população e nos trabalhadores resultantes dos transportes de embalados para o Aeroporto Internacional de Guarulhos (Cumbica) utilizando um fator de absorção de energia para cabine do meio de transporte

Nesta condição, foi considerado um fator de absorção de 0,5 devido às condições determinadas para o arranjo das cargas, ou seja, os embalados de IT menores foram colocados próximos à cabine do meio de transporte, de forma a permitir que estes embalados servissem como blindagem para os embalados de IT maiores.

Além disso, foram consideradas as blindagens dos materiais da cabine, como o vidro e a chapa de aço, que são utilizadas para fabricação da cabine.

As informações utilizadas para os cálculos das doses recebidas pelos trabalhadores e pela população resultantes dos transportes dos 10.890 embalados, nas 330 viagens realizadas do IPEN – CNEN/SP até o Aeroporto Internacional de Guarulhos, foram as mesmas contidas no item 5.7. Foi utilizado o programa computacional e o fator de absorção de energia considerado pela blindagem dos embalados de IT menores foi de 0,5.

As doses calculadas para a população nas zonas urbana e suburbana são iguais aquelas doses contidas nas Tabelas 5.20 e 5.21, ou seja, a introdução de blindagens na cabine não muda as doses na população. No entanto, as doses calculadas para o trabalhador que conduz o meio de transporte são sensivelmente diminuídas com a introdução de blindagens.

Na Tabela 5.23 são apresentadas a taxa de dose calculada na cabine do meio de transporte e as doses anuais calculadas para os trabalhadores envolvidos nas operações de condução do meio de transporte, carga e descarga, no percurso IPEN – CNEN/SP - Aeroporto Internacional de Guarulhos (Cumbica), com a utilização do programa computacional e a consideração de um fator de absorção de energia de 0,5.

TABELA 5.23 – Taxa de dose calculada na cabine e doses anuais calculadas para os trabalhadores

Taxa de dose média na cabine do meio de transporte ($\mu\text{Sv/h}$)	$84,83 \pm 8,65$
Dose total média para cada trabalhador nos transportes (motorista) (mSv)	$5,38 \pm 0,77$
Dose total média para cada trabalhador pelas cargas (mSv)	$5,93 \pm 0,59$
Dose total média para cada trabalhador pelas descargas (mSv)	$5,93 \pm 0,59$
Dose total média para cada trabalhador pelos transportes, cargas e descargas (mSv)	$17,24 \pm 1,14$
Dose/IT (μSv)	$11,84 \pm 0,89$

5.9 Doses anuais na população e nos trabalhadores resultantes dos transportes de embalados para a Cidade do Rio de Janeiro

Para os cálculos das doses recebidas pelos trabalhadores e pela população resultantes dos transportes dos 4.819 embalados, nas 229 viagens realizadas do IPEN – CNEN/SP até a Cidade do Rio de Janeiro foi utilizado o programa computacional e as informações constantes nas tabelas 5.24, 5.25, 5.26 e 5.27. Neste caso, não houve preocupação de arranjo da carga e não foi considerada a blindagem em virtude de vidros, ferragens e do banco da cabine do meio de transporte.

TABELA 5.24 – Informações utilizadas para os cálculos das doses recebidas pelos trabalhadores e pela população

$n_x.n_y.n_z$	Arranjo da carga (condição mais desfavorável)	4 x 3 x 2
r_e	Raio do embalado	0,15 m
h	Altura do embalado	0,4 m
$\mu_{en}\cdot X$	Espessura efetiva de blindagem de chumbo	5 cm
n_e	Número total de embalados por viagem	21
I_{tt}	IT médio transportado por viagem	19,2
n_{vvt_e}	Número de viagens anuais	229
t_v	Tempo gasto em cada viagem	4,8 h
t_c/t_d	Tempo gasto em cada operação de carga/descarga	0,00694 h
n_{tc}/n_{td}	Número de trabalhadores em cada operação de carga/descarga	1
n_{ttc}/n_{tt_d}	Número total de trabalhadores disponíveis para as operações de carga/descarga	4
y_{pilha}	Distância trabalhador-pilha (eixo y)	0,4 m
n_{tv}	Número de trabalhadores na condução de cada meio de transporte	1
n_{ttv}	Número total de trabalhadores na condução do meio de transporte	4
d_{total}	Distância percorrida	400.000 m
$comp_{veículo}$	Comprimento dos meios de transportes	5 m
$largura_{de}_{pista}$	Largura das pistas	2,5 m

Nas tabelas 5.25, 5.26 e 5.27 são mostradas as informações referentes às respectivas zonas.

TABELA 5.25 – Informações referentes à zona urbana

f	Fração da distância percorrida	10% (0,1)
vm	Velocidade média	40.000 m/h
dp	Densidade populacional da zona suburbana	0,08 hab/m ²
	População residente	25.600 pessoas
	População que trafega no mesmo sentido	73.846 pessoas
	População que trafega no sentido oposto	49.230 pessoas
x _{min}	Distância mínima indivíduo-meio de transporte	1 m
x _{max}	Distância máxima indivíduo - meio de transporte:	5 m
x _{pm}	Distância entre pistas no mesmo sentido	2.5 m
n _{prms}	Número de pessoas por veículo no mesmo sentido	2
n _{prso}	Número de pessoas por veículo no sentido oposto	2
x _{po}	Distância entre pistas no sentido oposto	3 m

TABELA 5.26 – Informações referentes à zona suburbana

f	Fração da distância percorrida	10% (0,1)
vm	Velocidade média	60.000 m/h
dp	Densidade populacional da zona suburbana	0,008 hab/m ²
	População residente	9.600 pessoas
	População que trafega no mesmo sentido	16.000 pessoas
	População que trafega no sentido oposto	16.000 pessoas
x _{min}	Distância mínima indivíduo-meio de transporte	5 m
x _{max}	Distância máxima indivíduo - meio de transporte:	20 m
x _{pm}	Distância entre pistas no mesmo sentido	3 m
n _{prms}	Número de pessoas por veículo no mesmo sentido	2
n _{prso}	Número de pessoas por veículo no sentido oposto	2
x _{po}	Distância entre pistas no sentido oposto	3 m

TABELA 5.27 – Informações referentes à zona rural

f	Fração da distância percorrida	80% (0,8)
vm	Velocidade média	100.000 m/h
dp	Densidade populacional da zona suburbana	0,001 hab/m ²
	População residente	51.200 pessoas
	População que trafega no mesmo sentido	46.545 pessoas
	População que trafega no sentido oposto	46.545 pessoas
x _{min}	Distância mínima indivíduo-meio de transporte	20 m
x _{max}	Distância máxima indivíduo - meio de transporte:	100 m
x _{pm}	Distância entre pistas no mesmo sentido	3 m
n _{prms}	Número de pessoas por veículo no mesmo sentido	2
n _{prso}	Número de pessoas por veículo no sentido oposto	2
x _{po}	Distância entre pistas no sentido oposto	3 m

Na Tabela 5.28 são apresentados os valores de doses anuais calculadas para a população da Zona Urbana, no percurso IPEN – CNEN/SP – Cidade do Rio de Janeiro, com a utilização do programa computacional.

TABELA 5.28 – Doses anuais calculadas para a população da Zona Urbana

	População residente	População que trafega no mesmo sentido	População que trafega no sentido oposto
Dose individual mínima	(0,82 ± 0,15) μSv	NA	NA
Dose individual máxima	(8,21 ± 1,51) μSv	(0,20 ± 0,01) mSv	(10,01 ± 0,01) nSv
Dose individual média	(1,65 ± 0,31) μSv	(10,01 ± 0,01) nSv	(10,01 ± 0,01) nSv
Dose coletiva mínima	(21,01 ± 3,85) mSv	NA	NA
Dose coletiva máxima	(210,13 ± 38,58) mSv	NA	NA
Dose coletiva	(42,26 ± 7,76) mSv	(0,54 ± 0,09) mSv	(0,45 ± 0,09) mSv

NA: não aplicável

Na Tabela 5.29 são apresentados os valores de doses anuais calculadas para a população da Zona Suburbana, no percurso IPEN – CNEN/SP - Cidade do Rio de Janeiro, com a utilização do programa computacional.

TABELA 5.29 – Doses anuais calculadas para a população da Zona Suburbana

	População residente	População que trafega no mesmo sentido	População que trafega no sentido oposto
Dose individual mínima	$(0,13 \pm 0,02) \mu\text{Sv}$	NA	NA
Dose individual máxima	$(1,09 \pm 0,20) \mu\text{Sv}$	$(33,81 \pm 0,31) \mu\text{Sv}$	$(10,01 \pm 0,01) \text{nSv}$
Dose individual média	$(0,25 \pm 0,05) \mu\text{Sv}$	$(10,01 \pm 0,01) \text{nSv}$	$(10,01 \pm 0,01) \text{nSv}$
Dose coletiva mínima	$(1,31 \pm 0,24) \text{mSv}$	NA	NA
Dose coletiva máxima	$(10,61 \pm 1,93) \text{mSv}$	NA	NA
Dose coletiva	$(2,42 \pm 0,44) \text{mSv}$	$(35,91 \pm 6,59) \mu\text{Sv}$	$(98,44 \pm 13,32) \mu\text{Sv}$

NA: não aplicável

Na Tabela 5.30 são apresentados os valores de doses anuais calculadas para a população da Zona Rural, no percurso IPEN – CNEN/SP - Cidade do Rio de Janeiro, com a utilização do programa computacional.

TABELA 5.30 – Doses anuais calculadas para a população da Zona Rural

	População residente	População que trafega no mesmo sentido	População que trafega no sentido oposto
Dose individual mínima	$(0,02 \pm 0,01) \mu\text{Sv}$	NA	NA
Dose individual máxima	$(0,16 \pm 0,03) \mu\text{Sv}$	$(162,26 \pm 0,03) \mu\text{Sv}$	$(4,77 \pm 0,87) \text{nSv}$
Dose individual média	$(0,03 \pm 0,01) \mu\text{Sv}$	$(1,24 \pm 0,22) \text{nSv}$	$(3,69 \pm 0,49) \text{nSv}$
Dose coletiva mínima	$(0,84 \pm 0,15) \text{mSv}$	NA	NA
Dose coletiva máxima	$(8,41 \pm 1,54) \text{mSv}$	NA	NA
Dose coletiva	$(1,69 \pm 0,31) \text{mSv}$	$(57,73 \pm 10,61) \mu\text{Sv}$	$(0,17 \pm 0,02) \text{mSv}$

NA: não aplicável

Na Tabela 5.31 são apresentadas a taxa de dose média calculada na cabine do meio de transporte e as doses anuais calculadas para os trabalhadores envolvidos nas operações de condução do meio de transporte, carga e descarga, no percurso IPEN – CNEN/SP - Cidade do Rio de Janeiro, com a utilização do programa computacional.

Estas doses já foram calculadas utilizando as medidas dos monitoramentos dos trabalhadores, dos embalados e dos meios de transporte. O cálculo computacional é de grande importância para uma comparação com os valores medidos pelo monitoramento para propósitos de validação do modelo matemático.

TABELA 5.31 – Taxa de dose calculada na cabine e doses anuais calculadas para os trabalhadores

Taxa de dose média na cabine do meio de transporte ($\mu\text{Sv/h}$)	$145,01 \pm 22,33$
Dose total média para cada trabalhador nos transportes (motorista) (mSv)	$40,41 \pm 7,41$
Dose total média para cada trabalhador pelas cargas (mSv)	$4,48 \pm 0,45$
Dose total média para cada trabalhador pelas descargas (mSv)	$4,48 \pm 0,45$
Dose total média para cada trabalhador pelos transportes, cargas e descargas (mSv)	$49,36 \pm 7,44$
Dose/IT (μSv)	$44,91 \pm 8,65$

5.10 Doses anuais na população e nos trabalhadores resultantes dos transportes de embalados para a Cidade do Rio de Janeiro utilizando um fator de absorção de energia para cabine do meio de transporte

Nesta condição, foi considerado um fator de absorção de energia de 0,45 devido às condições determinadas para o arranjo das cargas, ou seja, os embalados de IT menores foram colocados próximos à cabine do meio de transporte de forma a permitir que estes embalados servissem como blindagem para os embalados de IT maiores.

Além disso, foram consideradas as blindagens dos materiais da cabine, como o vidro e a chapa de aço que são utilizadas para fabricação da cabine.

As informações utilizadas para os cálculos das doses recebidas pelos trabalhadores e pela população resultantes dos transportes dos 4.819 embalados, nas 229 viagens realizadas do IPEN – CNEN/SP para a Cidade do Rio de Janeiro, foram as mesmas contidas no item 5.9. Foi utilizado o programa computacional e o fator de absorção de energia considerado pela blindagem dos embalados de IT menores foi de 0,45.

As doses calculadas para a população nas zonas urbana, suburbana e rural são iguais àquelas doses contidas nas Tabelas 5.28, 5.29 e 5.30, ou seja, a introdução de blindagens na cabine não muda as doses na população. No entanto, as doses calculadas para o trabalhador que conduz o meio de transporte são sensivelmente diminuídas com a introdução de blindagens.

Na Tabela 5.32 são apresentadas a taxa de dose calculada na cabine do meio de transporte e as doses anuais calculadas para os trabalhadores envolvidos nas operações de condução do meio de transporte, carga e descarga, no percurso IPEN – CNEN/SP - Cidade do Rio de Janeiro, com a utilização do programa computacional e a consideração de um fator de absorção de energia de 0,45.

TABELA 5.32 – Taxa de dose calculada na cabine e doses anuais calculadas para os trabalhadores

Taxa de dose média na cabine do meio de transporte ($\mu\text{Sv/h}$)	$65,25 \pm 10,05$
Dose total média para cada trabalhador nos transportes (motorista) (mSv)	$18,18 \pm 3,33$
Dose total média para cada trabalhador pelas cargas (mSv)	$4,47 \pm 0,45$
Dose total média para cada trabalhador pelas descargas (mSv)	$4,47 \pm 0,45$
Dose total média para cada trabalhador pelos transportes, cargas e descargas (mSv)	$27,13 \pm 3,39$
Dose/IT (μSv)	$24,68 \pm 4,28$

5.11 Doses anuais na população e nos trabalhadores resultantes dos transportes de embalados para a Cidade de Belo Horizonte

Para os cálculos das doses recebidas pelos trabalhadores e pela população resultantes dos transportes dos 1.341 embalados, nas 96 viagens realizadas do IPEN – CNEN/SP até a Cidade de Belo Horizonte, foi utilizado o programa computacional e as informações constantes nas tabelas 5.33, 5.34, 5.35 e 5.36. Neste caso, não houve preocupação de arranjo da carga e não foi considerada a blindagem em virtude de vidros, ferragens e do banco da cabine do meio de transporte.

TABELA 5.33 – Informações utilizadas para os cálculos das doses recebidas pelos trabalhadores e pela população

$n_x.n_y.n_z$	Arranjo da carga (condição mais desfavorável)	4 x 2 x 2
r_e	Raio do embalado	0,15 m
h	Altura do embalado	0,4 m
$\mu_{en.X}$	Espessura efetiva de blindagem de chumbo	5 cm
n_e	Número total de embalados por viagem	14
I_{tt}	IT médio transportado por viagem	11,4
n_{vvt}	Número de viagens anuais	96
t_v	Tempo gasto em cada viagem	6,52 h
t_c/t_d	Tempo gasto em cada operação de carga/descarga	0,00694 h
n_{tc}/n_{td}	Número de trabalhadores em cada operação de carga/descarga	1
n_{ttc}/n_{ttt}	Número total de trabalhadores disponíveis para as operações de carga/descarga	3
y_{pilha}	Distância trabalhador-pilha (eixo y)	0,4 m
n_{tv}	Número de trabalhadores na condução de cada meio de transporte	1
n_{ttv}	Número total de trabalhadores na condução do meio de transporte	3
d_{total}	Distância percorrida	500.000 m
$comp_{veículo}$	Comprimento dos meios de transportes	5 m
$largura_{de}_{pista}$	Largura das pistas	2,5 m

Nas tabelas 5.34, 5.35 e 5.36 são mostradas as informações referentes às respectivas zonas.

TABELA 5.34 – Informações referentes à zona urbana

f	Fração da distância percorrida	10% (0,1)
vm	Velocidade média	40.000 m/h
dp	Densidade populacional da zona suburbana	0,08 hab/m ²
	População residente	32.000 pessoas
	População que trafega no mesmo sentido	92.307 pessoas
	População que trafega no sentido oposto	61.538 pessoas
x _{min}	Distância mínima indivíduo-meio de transporte	1 m
x _{max}	Distância máxima indivíduo - meio de transporte:	5 m
x _{pm}	Distância entre pistas no mesmo sentido	2.5 m
n _{prms}	Número de pessoas por veículo no mesmo sentido	2
n _{prso}	Número de pessoas por veículo no sentido oposto	2
x _{po}	Distância entre pistas no sentido oposto	3 m

TABELA 5.35 – Informações referentes à zona suburbana

f	Fração da distância percorrida	10% (0,1)
vm	Velocidade média	60.000 m/h
dp	Densidade populacional da zona suburbana	0,008 hab/m ²
	População residente	12.000 pessoas
	População que trafega no mesmo sentido	20.000 pessoas
	População que trafega no sentido oposto	20.000 pessoas
x _{min}	Distância mínima indivíduo-meio de transporte	5 m
x _{max}	Distância máxima indivíduo - meio de transporte:	20 m
x _{pm}	Distância entre pistas no mesmo sentido	3 m
n _{prms}	Número de pessoas por veículo no mesmo sentido	2
n _{prso}	Número de pessoas por veículo no sentido oposto	2
x _{po}	Distância entre pistas no sentido oposto	3 m

TABELA 5.36 – Informações referentes à zona rural

f	Fração da distância percorrida	80% (0,8)
vm	Velocidade média	90.000 m/h
dp	Densidade populacional da zona suburbana	0,001 hab/m ²
	População residente	64.000 pessoas
	População que trafega no mesmo sentido	58.181 pessoas
	População que trafega no sentido oposto	58.181 pessoas
x _{min}	Distância mínima indivíduo-meio de transporte	20 m
x _{max}	Distância máxima indivíduo - meio de transporte:	100 m
x _{pm}	Distância entre pistas no mesmo sentido	3 m
n _{prms}	Número de pessoas por veículo no mesmo sentido	2
n _{prso}	Número de pessoas por veículo no sentido oposto	2
x _{po}	Distância entre pistas no sentido oposto	3 m

Na Tabela 5.37 são apresentados os valores de doses anuais calculadas para a população da Zona Urbana, no percurso IPEN – CNEN/SP – Cidade de Belo Horizonte, com a utilização do programa computacional.

TABELA 5.37 – Doses anuais calculadas para a população da Zona Urbana

	População residente	População que trafega no mesmo sentido	População que trafega no sentido oposto
Dose individual mínima	(0,21 ± 0,03) μSv	NA	NA
Dose individual máxima	(2,11 ± 0,32) μSv	(155,46 ± 5,23) μSv	(10,01 ± 0,01) nSv
Dose individual média	(0,42 ± 0,06) μSv	(10,01 ± 0,01) nSv	(10,01 ± 0,01) nSv
Dose coletiva mínima	(6,75 ± 1,04) mSv	NA	NA
Dose coletiva máxima	(67,51 ± 10,39) mSv	NA	NA
Dose coletiva	(13,58 ± 2,09) mSv	(0,41 ± 0,06) mSv	(0,34 ± 0,04) mSv

NA: não aplicável

Na Tabela 5.38 são apresentados os valores de doses anuais calculadas para a população da Zona Suburbana, no percurso IPEN – CNEN/SP - Cidade de Belo Horizonte, com a utilização do programa computacional.

TABELA 5.38 – Doses anuais calculadas para a população da Zona Suburbana

	População residente	População que trafega no mesmo sentido	População que trafega no sentido oposto
Dose individual mínima	$(0,03 \pm 0,01) \mu\text{Sv}$	NA	NA
Dose individual máxima	$(0,28 \pm 0,04) \mu\text{Sv}$	$(25,91 \pm 0,14) \mu\text{Sv}$	$(4,88 \pm 0,75) \text{nSv}$
Dose individual média	$(0,06 \pm 0,01) \mu\text{Sv}$	$(1,3 \pm 0,21) \text{nSv}$	$(3,77 \pm 0,42) \text{nSv}$
Dose coletiva mínima	$(0,42 \pm 0,06) \text{mSv}$	NA	NA
Dose coletiva máxima	$(3,37 \pm 0,52) \text{mSv}$	NA	NA
Dose coletiva	$(0,78 \pm 0,12) \text{mSv}$	$(27,52 \pm 4,23) \mu\text{Sv}$	$(75,45 \pm 8,56) \mu\text{Sv}$

NA: não aplicável

Na Tabela 5.39 são apresentados os valores de doses anuais calculadas para a população da Zona Rural, no percurso IPEN – CNEN/SP - Cidade de Belo Horizonte, com a utilização do programa computacional.

TABELA 5.39 – Doses anuais calculadas para a população da Zona Rural

	População residente	População que trafega no mesmo sentido	População que trafega no sentido oposto
Dose individual mínima	$(4,68 \pm 0,72) \text{nSv}$	NA	NA
Dose individual máxima	$(0,05 \pm 0,01) \mu\text{Sv}$	$(0,140 \pm 0,01) \text{mSv}$	$(3,25 \pm 0,50) \text{nSv}$
Dose individual média	$(9,42 \pm 1,45) \text{nSv}$	$(0,84 \pm 0,13) \text{nSv}$	$(2,51 \pm 0,28) \text{nSv}$
Dose coletiva mínima	$(0,30 \pm 0,045) \text{mSv}$	NA	NA
Dose coletiva máxima	$(3,00 \pm 4,61) \text{mSv}$	NA	NA
Dose coletiva	$(0,61 \pm 0,09) \text{mSv}$	$(49,17 \pm 7,56) \mu\text{Sv}$	$(0,14 \pm 0,02) \text{mSv}$

NA: não aplicável

Na Tabela 5.40 são apresentadas a taxa de dose média calculada na cabine do meio de transporte e as doses anuais calculadas para os trabalhadores envolvidos nas operações de condução do meio de transporte, carga e descarga, no percurso IPEN – CNEN/SP - Cidade de Belo Horizonte, com a utilização do programa computacional.

Estas doses já foram calculadas utilizando as medidas dos monitoramentos dos trabalhadores, dos embalados e dos meios de transporte. O cálculo computacional é de grande importância para uma comparação com os valores medidos pelo monitoramento para propósitos de validação do modelo matemático.

TABELA 5.40 – Taxa de dose calculada na cabine e doses anuais calculadas para os trabalhadores

Taxa de dose média na cabine do meio de transporte ($\mu\text{Sv/h}$)	$129,15 \pm 15,11$
Dose total média para cada trabalhador nos transportes (motorista) (mSv)	$26,98 \pm 4,15$
Dose total média para cada trabalhador pelas cargas (mSv)	$1,077 \pm 0,11$
Dose total média para cada trabalhador pelas descargas (mSv)	$1,077 \pm 0,11$
Dose total média para cada trabalhador pelos transportes, cargas e descargas (mSv)	$29,13 \pm 4,15$
Dose/IT (μSv)	$79,85 \pm 13,75$

5.12 Doses anuais na população e nos trabalhadores resultantes dos transportes de embalados para a Cidade de Belo Horizonte utilizando um fator de absorção de energia para cabine do meio de transporte

Nesta condição, foi considerado um fator de absorção de energia de 0,6 devido às condições determinadas para o arranjo das cargas, ou seja, os embalados de IT menores foram colocados próximos a cabine do meio de transporte de forma a permitir que estes embalados servissem como blindagem para os embalados de IT maiores.

Além disso, foram consideradas as blindagens dos materiais da cabine, como o vidro e a chapa de aço, que são utilizadas para fabricação da cabine.

As informações utilizadas para os cálculos das doses recebidas pelos trabalhadores e pela população resultantes dos transportes dos 4.819 embalados, nas 229 viagens realizadas do IPEN – CNEN/SP para a Cidade de Belo Horizonte, foram as mesmas contidas no item 5.11. Foi utilizado o programa computacional e o fator de absorção de energia considerado pela blindagem dos embalados de IT menores foi de 0,6.

As doses calculadas para a população nas zonas urbana, suburbana e rural são iguais àquelas doses contidas nas Tabelas 5.37, 5.38 e 5.39, ou seja, a introdução de blindagens na cabine não muda as doses na população. No entanto, as doses calculadas para o trabalhador que conduz o meio de transporte são sensivelmente diminuídas com a introdução de blindagens.

Na Tabela 5.41 são apresentadas a taxa de dose calculada na cabine do meio de transporte e as doses anuais calculadas para os trabalhadores envolvidos nas operações de condução do meio de transporte, carga e descarga, no percurso IPEN – CNEN/SP - Cidade de Belo Horizonte, com a utilização do programa computacional e a consideração de um fator de absorção de energia de 0,6.

TABELA 5.41 – Taxa de dose calculada na cabine e doses anuais calculadas para os trabalhadores

Taxa de dose média na cabine do meio de transporte ($\mu\text{Sv/h}$)	$77,49 \pm 9,06 \mu\text{Sv}$
Dose total média para cada trabalhador nos transportes (motorista) (mSv)	$16,18 \pm 2,49$
Dose total média para cada trabalhador pelas cargas (mSv)	$1,07 \pm 0,11 \text{ mSv}$
Dose total média para cada trabalhador pelas descargas (mSv)	$1,07 \pm 0,11 \text{ mSv}$
Dose total média para cada trabalhador pelos transportes, cargas e descargas (mSv)	$18,34 \pm 2,49 \text{ mSv}$
Dose/IT(μSv)	$50,27 \pm 8,38 \mu\text{Sv}$

6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Reportando-se aos objetivos do presente trabalho, item 1.6, a principal tarefa deste Capítulo será a demonstração de que todos os objetivos propostos foram cumpridos, além de outras discussões que os resultados do Capítulo 5 proporcionaram.

6.1 Cálculos das doses na população residente junto às vias de transporte

Com a utilização de um programa computacional foram calculadas as doses máximas, mínimas e médias para os indivíduos do público que permanecem nas residências próximas às vias de transporte, nos quatro percursos: IPEN – CNEN/SP – Aeroporto de Congonhas, IPEN – CNEN/SP – Aeroporto Internacional de Guarulhos (Cumbica); IPEN – CNEN/SP – Cidade do Rio de Janeiro e IPEN – CNEN/SP – Cidade de Belo Horizonte.

Na Tabela 6.1 são apresentadas as doses anuais nas populações residentes nos quatro destinos e nas zonas urbanas e suburbanas para comparação e análise do comportamento das doses nestas respectivas populações.

Analisando os valores constantes na Tabela 6.1, pode-se concluir que a maior contribuição para as doses recebidas pela população residente, próximas às vias de transporte, se devem principalmente a velocidade média do meio de transporte e a distância percorrida. A quantidade de viagens e o IT total do meio de transporte são fatores importantes na composição das doses, mas comparando o percurso IPEN – Aeroporto de Congonhas com o percurso IPEN – Aeroporto Internacional de Guarulhos onde os ITs totais dos meios de transporte e as quantidades de viagens são similares, chega-se a conclusão que a velocidade média do meio de transporte é o fator mais sensível na composição das doses na população residente.

A dose individual máxima anual calculada para um indivíduo residente nas zonas rurais foi de 0,16 μSv . Este valor de dose pode ser desprezado, já que doses anuais inferiores a 10 μSv são consideradas zero pelas autoridades reguladoras.

Entre as doses contidas na Tabela 6.1, as que geram interesse da proteção radiológica são apenas as doses individuais máximas de 50,41 μSv e 33,60 μSv calculadas nas zonas urbana dos percursos: IPEN – CNEN/SP – Aeroporto de Congonhas e IPEN – CNEN/SP – Aeroporto Internacional de Guarulhos (Cumbica), respectivamente. Esse interesse se deve ao fato de que estas doses são as únicas que estão acima do valor de 10 μSv e, portanto, será importante averiguar num trabalho futuro, quais e quantos são os indivíduos do público que recebem estas doses.

TABELA 6.1 – Doses anuais calculadas para as populações residentes nas Zonas Urbanas e Suburbanas, dos quatro percursos (μSv)

	Dose individual (zona urbana)			Dose individual (zona suburbana)		
	mínima	máxima	média	mínima	máxima	média
População residente no percurso IPEN – Aeroporto de Congonhas	5,04	50,41	10,06	1,26	10,08	2,32
População residente no percurso IPEN – Aeroporto Internacional de Guarulhos	3,36	33,60	6,75	0,84	6,72	1,55
População residente no percurso IPEN – Cidade do Rio de Janeiro	0,82	8,21	1,65	0,13	1,09	0,25
População residente no percurso IPEN – Cidade de Belo Horizonte	0,21	2,11	0,42	0,03	0,28	0,06

6.2 Cálculos das doses nas pessoas que estão nos veículos que trafegam nas vias próximas ao meio de transporte

Com a utilização do programa computacional foram calculadas as doses máximas e médias para as pessoas que estão nos veículos que trafegam nas vias de transporte, no mesmo sentido e no sentido contrário do meio de transporte, tanto na mesma direção como na via paralela, nos quatro percursos considerados neste trabalho. As doses mínimas para estas pessoas que trafegam nas vias de transporte estão muito próximas de zero e por isso não foram consideradas.

Na Tabela 6.2 são apresentadas as doses anuais naquelas pessoas, nos quatro destinos, nas zonas urbanas, suburbanas e rurais para comparação e análise do comportamento das doses nestas respectivas populações.

Analisando os valores constantes na Tabela 6.2, pode-se concluir que as maiores doses são recebidas pelas pessoas que estão nos veículos que trafegam nas vias de transporte, no mesmo sentido do meio de transporte. Essas doses são pequenas, principalmente, se for levado em conta o fato de que são adotadas condições bastante restritivas, já que foi considerado que os mesmos veículos viajam todo o percurso ao lado do meio de transporte. As doses recebidas pelas pessoas que trafegam no sentido contrário do meio de transporte são muito pequenas e não despertam qualquer interesse do ponto de vista de proteção radiológica, ainda mais se for levado em conta o fato de que foram adotadas condições muito restritivas.

Ainda com relação às doses calculadas para as pessoas que trafegam nas vias de transporte, no mesmo sentido, constata-se que as doses individuais médias são muito pequenas, próximas do zero. Por isso, será importante averiguar num trabalho futuro, quais e quantos são os indivíduos do público que recebem estas doses nos quatro percursos, já que os valores de doses individuais médias sugerem que uma parcela pequena de pessoas recebe estas doses.

TABELA 6.2 – Doses anuais calculadas para as pessoas que trafegam nas vias de transporte nas Zonas Urbanas, Suburbanas e Rurais e para os quatro percursos ($\mu\text{Sv}/\text{ano}$)

	Dose individual (zona urbana)				Dose individual (zona suburbana)				Dose individual (zona rural)			
	Máxima		Média		Máxima		Média		Máxima		Média	
	MS	SO	MS	SO	MS	SO	MS	SO	MS	SO	MS	SO
Pessoas que trafegam nas vias: IPEN – Aeroporto de Congonhas	29,3	0,05	0,03	0,04	65,9	0,05	0,02	0,04	NA	NA	NA	NA
Pessoas que trafegam nas vias: IPEN – Aeroporto Internacional de Guarulhos	115,2	0,03	0,02	0,03	115,2	0,04	0,01	0,03	NA	NA	NA	NA
Pessoas que trafegam nas vias: IPEN – Rio de Janeiro	202,8	0,01	0,01	0,01	33,8	0,01	0,01	0,01	162,2	0,004	0,001	0,003
Pessoas que trafegam nas vias: IPEN – Belo Horizonte	155,4	0,01	0,01	0,01	25,9	0,004	0,001	0,003	138,1	0,003	0,001	0,002

MS: mesmo sentido; SO: sentido oposto; e NA: não aplicável

6.3 Cálculos das doses nos trabalhadores (motoristas) que conduzem os meios de transporte para os quatro destinos

As doses nos trabalhadores que conduziram os meios de transporte nos quatro destinos foram determinadas por meio de duas técnicas de cálculos.

Na primeira técnica, foram utilizadas as medidas experimentais de taxa de dose na cabine dos meios de transporte, para cada destino e para cada viagem. Com a determinação da média destas medidas, considerando cada destino, e o conhecimento dos tempos envolvendo estes transportes, nos diversos percursos, foram calculadas as doses recebidas por esses trabalhadores.

Na outra técnica, foi utilizado um programa computacional para efetuar os cálculos de doses a partir do índice de transporte médio transportado por viagem para cada destino.

Na Tabela 6.3 são apresentadas as doses anuais nos trabalhadores que conduziram os meios de transporte para cada destino do material radioativo, utilizando as doses medidas experimentalmente e por meio da utilização do programa computacional.

Analisando os valores constantes na Tabela 6.3, pode-se concluir que as doses obtidas a partir das medidas experimentais são similares às doses calculadas pelo programa computacional, sugerindo que o programa desenvolvido para estes cálculos está adequado, ou seja, pode ser considerado como um programa validado para este tipo de cálculo. É importante comentar o fato de que o uso de um fator de absorção de energia extra praticamente equipara os valores calculados a partir das medidas experimentais com os valores calculados pelo programa computacional.

TABELA 6.3 - Doses recebidas pelos trabalhadores (motoristas) nas operações de transporte (mSv/ano)

	Doses anuais nos trabalhadores (medidas experimentais)		Doses anuais nos trabalhadores (programa computacional)			
	Dose média recebida por trabalhador	Dose total recebida pelos trabalhadores	Dose individual por trabalhador		Dose total para os trabalhadores	
			SFA	CFA	SFA	CFA
Percurso IPEN – Aeroporto de Congonhas	4,46	35,68	6,06	4,48	48,48	35,84
Percurso IPEN – Aeroporto Internacional de Guarulhos	5,15	41,23	10,77	5,38	86,16	43,04
Percurso IPEN – Cidade do Rio de Janeiro	16,69	66,77	40,41	18,18	161,6	72,72
Percurso IPEN – Cidade de Belo Horizonte	14,72	44,18	26,98	16,18	80,94	48,54

SFA: sem fator de absorção; e CFA: com fator de absorção

6.4 Cálculos das doses anuais nos trabalhadores resultantes das operações de carga e descarga dos embalados

As doses nos trabalhadores resultantes das operações de carga e descarga dos embalados, também, foram determinadas por meio de duas técnicas de cálculos.

Na primeira técnica, foram utilizadas as medidas experimentais das doses recebidas pelos trabalhadores durante as operações de carga. Foi considerado que as doses dos trabalhadores nas operações de descarga são iguais as doses nas operações de carga.

Na outra técnica, foi utilizado o programa computacional para efetuar os cálculos de doses a partir do número de embalados carregados e seus respectivos índices de transporte para cada viagem e cada destino.

Na Tabela 6.4 são apresentadas as doses anuais nos trabalhadores resultantes das operações de carga e descarga dos embalados, utilizando as doses medidas experimentalmente e por meio da utilização do programa computacional.

Analisando os valores constantes na Tabela 6.4, pode-se concluir que para os percursos IPEN – CNEN/SP – Aeroporto de Congonhas e IPEN – CNEN/SP – Aeroporto internacional de Guarulhos as doses obtidas a partir das medidas experimentais são similares as doses calculadas pelo programa computacional, sugerindo mais uma vez que o programa desenvolvido para estes cálculos está adequado, ou seja, pode ser considerado como um programa validado para este tipo de cálculo.

É importante comentar o fato de que nos outros percursos existem diferenças significativas entre as doses obtidas a partir das medidas experimentais e as doses calculadas pelo programa computacional. Isso ocorre em virtude da diferença dos números de embalados transportado para cada destino, já que no caso das doses obtidas a partir das medidas experimentais foi considerado que a dose nas operações de carga e descarga são sempre as mesmas para todos os destinos, independente do número de embalados que é carregado.

No caso do programa computacional, as doses resultantes das operações de carga e descarga dos embalados dependem do número de embalados que são carregados e dos índices de transporte de cada embalado. A quantidade de embalados em cada viagem varia de acordo com o seu destino. Em valores médios, essa variação da quantidade de embalados por viagem vai de 14 a 35 embalados e em consequência, varia também o valor médio do índice de transporte carregado em cada meio de transporte.

TABELA 6.4 - Doses nos trabalhadores devido às operações de carga e descarga (mSv/ano)

	Doses anuais nos trabalhadores (medidas experimentais)				Doses anuais nos trabalhadores (programa computacional)			
	Dose individual		Dose total		Dose individual		Dose total	
	Carga	Desc.	Carga	Desc.	Carga	Desc.	Carga	Desc.
Percurso IPEN – Aeroporto de Congonhas	6,52	6,52	52,19	52,19	5,44	5,44	43,52	43,52
Percurso IPEN – Aeroporto Internacional de Guarulhos	5,89	5,89	47,19	47,19	5,93	5,93	47,44	47,44
Percurso IPEN – Cidade do Rio de Janeiro	8,18	8,18	32,74	32,74	4,48	4,48	17,92	17,92
Percurso IPEN – Cidade de Belo Horizonte	4,57	4,57	13,78	13,78	1,07	1,07	3,21	3,21

6.5 Cálculos das doses anuais nos trabalhadores resultantes das operações de transporte, carga e descarga dos embalados, para cada percurso

As doses nos trabalhadores resultantes das operações de transporte, carga e descarga dos embalados foram determinadas por meio da utilização das medidas experimentais das doses recebidas pelos trabalhadores durante a realização daquelas operações e por meio do pelo programa computacional.

Na Tabela 6.5 são apresentadas as doses anuais recebidas por cada trabalhador e as doses totais recebidas pelos trabalhadores, por todos os transportes realizados em cada percurso.

Analisando os valores constantes na Tabela 6.5, pode-se concluir que as doses calculadas a partir das medidas experimentais são similares aos valores obtidos com a utilização do programa computacional com a correção do fator de absorção.

TABELA 6.5 - Doses recebidas pelos trabalhadores nas operações de transporte, carga e descarga (mSv/ano)

	Doses anuais nos trabalhadores (medidas experimentais)		Doses anuais nos trabalhadores (programa computacional)			
	Dose média recebida por trabalhador	Dose coletiva para os trabalhadores	Dose individual por trabalhador		Dose coletiva para os trabalhadores	
			SFA	CFA	SFA	CFA
Percurso IPEN – Aeroporto de Congonhas	17,51	140,08	66,94	15,37	535,4	122,9
Percurso IPEN – Aeroporto Internacional de Guarulhos	16,95	135,61	22,63	17,24	181,0	137,6
Percurso IPEN – Cidade do Rio de Janeiro	33,06	132,27	49,36	27,13	197,4	108,5
Percurso IPEN – Cidade de Belo Horizonte	23,87	71,63	29,13	18,34	87,3	55,2

SFA: sem fator de absorção; e CFA: com fator de absorção

6.6 Cálculos das doses coletivas anuais para cada percurso para realizar um futuro trabalho de otimização

Para os cálculos das doses coletivas anuais para a população que reside próximas as vias de transporte e para a população que trafega nas vias de transporte, no mesmo sentido e no sentido contrário do meio de transporte foi utilizado o programa computacional.

Na Tabela 6.6 são apresentadas as doses coletivas anuais na população devido ao transporte de radiofármacos para cada percurso em suas zonas urbana, suburbana e rural.

Analisando os valores constantes na Tabela 6.6, pode-se concluir que as doses coletivas anuais para a população que reside próximas as vias de transporte são pequenas e para a população que trafega nas vias de transporte, no mesmo sentido e no sentido contrário do meio de transporte são praticamente desprezíveis.

TABELA 6.6 - Doses coletivas anuais na população para cada percurso (mSv/ano)

Percurso	Dose coletiva anual (mSv/ano) (zona urbana)			Dose coletiva anual (mSv/ano) (zona suburbana)			Dose coletiva anual (mSv/ano) (zona rural)		
	RES	MS	SO	RES	MS	SO	RES	MS	SO
IPEN – Aeroporto de Congonhas	9,66	0,07	0,06	7,51	0,07	0,19	NA	NA	NA
IPEN – Aeroporto Internacional de Guarulhos	34,55	0,31	0,26	11,90	0,12	0,34	NA	NA	NA
IPEN – Cidade do Rio de Janeiro	42,26	0,54	0,45	2,42	0,03	0,09	1,69	0,05	0,17
IPEN – Cidade de Belo Horizonte	13,58	0,41	0,34	0,78	0,02	0,07	0,61	0,04	0,14

RES: residente; MS: mesmo sentido; SO: sentido oposto; e NA: não aplicável

Para fins de otimização essas doses coletivas das três zonas e para cada um dos quatro percursos devem ser somadas e depois somadas com aquelas doses referentes aos trabalhadores.

Na Tabela 6.7 são apresentadas as doses coletivas anuais na população devido ao transporte de radiofármacos para cada percurso e em cada zona e depois as doses somadas com as doses dos trabalhadores em cada zona e em cada percurso. Dessa forma, foram determinadas as doses totais para cada zona e cada percurso.

TABELA 6.7 – Doses anuais coletivas por percurso

Percurso	Dose coletiva anual (mSv/ano)				
	zona urbana	zona suburbana	zona rural	Trabalhadores (ME)	Total
IPEN – Aeroporto de Congonhas	9,79	7,77	NA	140,08	157,64
IPEN – Aeroporto Internacional de Guarulhos	35,12	12,36	NA	135,61	183,09
IPEN – Cidade do Rio de Janeiro	43,25	2,54	1,91	132,27	179,97
IPEN – Cidade de Belo Horizonte	14,33	0,87	0,79	71,63	87,62

MS: medidas experimentais; e NA: não aplicável

6.7 Comparações dos resultados obtidos com os limites anuais pertinentes

Com relação aos indivíduos do público, a maior dose individual estimada para um indivíduo do público foi de 202 $\mu\text{Sv}/\text{ano}$ e em condições a favor da segurança. Mesmo assim, esta dose é muito inferior ao limite anual estabelecido para os indivíduos do público, que é de 1 mSv/ano.

Já para os trabalhadores, a maior dose estimada foi de 49,36 mSv/ano, valor muito próximo ao limite anual estabelecido para trabalhadores, que é de 50 mSv/ano e muito superior a dose média em cinco anos consecutivos sugerida pelas autoridades reguladoras para o trabalhador, que é de 20 mSv/ano. No caso do nosso País, a autoridade reguladora é a Comissão Nacional de Energia Nuclear, CNEN, que estabeleceu como primeiro período de 01 de janeiro de 2005 a 31 de dezembro de 2009.

7. CONCLUSÕES

As doses esperadas para os indivíduos do público para atividades envolvendo o transporte de materiais radioativos são muito pequenas em relação aos seus limites anuais, pelo menos no que diz respeito ao transporte rodoviário. Dessa forma, os limites estabelecidos para os embalados e para os meios de transportes se mostraram adequados e suficientes para proteger os indivíduos do público quanto às doses de radiação ionizante resultante do transporte de materiais radioativos, em condições normais de transporte.

Com relação aos trabalhadores envolvidos com os transportes de materiais radioativos a situação é bem diferente, já que ficou constatado que esses trabalhadores estão sujeitos a doses de radiação ionizante bastante elevadas, chegando em alguns casos bem próximos dos limites anuais, portanto, com grande probabilidade de receberem doses superiores a 100 mSv no período de cinco anos.

Foi constatado durante o desenvolvimento deste trabalho que os trabalhadores que conduzem os meios de transporte não utilizam adequadamente seus dosímetros de corpo inteiro e que é necessária uma ação junto a esses trabalhadores para correção desta situação. As doses registradas pelos dosímetros para esses trabalhadores devem ser muito inferiores as doses reais que recebem, já que o dosímetro fica protegido pelo próprio tronco do corpo do trabalhador, não registrando a dose máxima recebida no corpo, como é exigido pelas recomendações internacionais e normas nacionais.

Conforme mostrado no Capítulo 6, “Discussão dos resultados”, em alguns casos, é urgente a necessidade de diminuição de determinadas doses nos trabalhadores, exigindo um procedimento de otimização com o uso das técnicas de ajuda para a tomada de decisões. Em outros casos, esta otimização deverá ser realizadas num tempo máximo de dois anos.

Este trabalho pode ser utilizado como uma ferramenta de gestão e planejamento por empresas envolvidas com o transporte de materiais radioativos, uma vez que se pode prever de antemão toda a infraestrutura necessária para realização do transporte de uma determinada quantidade de embalados.

Por último lembramos que os resultados alcançados são suficientes para validar o programa computacional desenvolvido para o cálculo de doses nos trabalhadores envolvidos em atividades de transporte de material radioativo.

8. FUTUROS TRABALHOS

- Realizar um trabalho semelhante a este para o transporte de radiofármacos por via aérea, já que atualmente existe uma quantidade elevada de recusas de cargas contendo materiais radioativos, por parte da maioria das empresas aéreas no Brasil e nos demais países. Um trabalho semelhante poderia esclarecer a que doses estão realmente submetidos os tripulantes e passageiros e por tanto verificar em que situações a recusa é justificada.
- Realizar trabalhos semelhantes a este para o transporte de outras fontes radioativas utilizadas em outras práticas, como por exemplo, radiografia industrial.
- Ainda que no momento, não desperte interesse no nosso País, mas em nível internacional pode ser importante a realização de um trabalho análogo para o transporte aquático e/ou ferroviário.
- Realizar um estudo para o percurso IPEN–CNEN/SP - Aeroporto de Congonhas e IPEN–CNEN/SP - Aeroporto Internacional de Guarulhos para determinar o número de pessoas residentes que recebem doses superiores ao valor de isenção de $10 \mu\text{Sv a}^{-1}$ para verificar se é representativo este número de residentes e no caso de ser representativo, como poderão ser diminuídas essas doses.
- Realizar um estudo análogo ao item anterior para as pessoas que trafegam próximas as vias de transporte, no mesmo sentido e no sentido contrário do meio de transporte, conforme mostram os resultados da Tabela 6.2.

- Torna urgente efetuar um trabalho de otimização para diminuir as doses dos trabalhadores que realizam os percursos IPEN – CNEN/SP - Cidade do Rio de Janeiro e IPEN – CNEN/SP - Cidade de Belo Horizonte, uma vez que existe uma grande probabilidade de desobedecerem o limite anual médio de dose nos próximos anos, conforme mostra a segunda coluna da Tabela 6.5 e as últimas linhas das Tabelas 5.7 e 5.9. Para tanto, as opções de proteção radiológica deverão considerar um possível aumento no número de trabalhadores e a colocação de diferentes espessuras de barreiras entre os embalados e a cabine do meio de transporte.

- Efetuar um trabalho de otimização análogo ao proposto no item anterior para os percursos IPEN–CNEN/SP - Aeroporto de Congonhas e IPEN–CNEN/SP - Aeroporto Internacional de Guarulhos, já que de acordo com a última linha das Tabelas 5.3 e 5.5, no ano de 2010 os trabalhadores deverão ultrapassar os limites de doses anuais médios.

- Realizar um trabalho propondo medidas para aumentar a cultura de segurança nos trabalhadores envolvidos com o transporte de material radioativo de forma a evitar ou minimizar doses desnecessárias.

ANEXO

PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA CÁLCULO DE DOSES

A.1 Apresentação da listagem do programa computacional

Para realizar os cálculos de doses foi escrito um programa utilizando o compilador C++ Visual Studio 2005, da empresa Microsoft.

O programa consta de 3 módulos que foram denominados: *main.cpp*, *carga.h* e *carga.cpp*.

O módulo *main.cpp* gerencia a execução do programa. O módulo *carga.h* descreve as propriedades do objeto "carga" e o módulo *carga.cpp* descreve as rotinas de cálculo.

O programa lê arquivos de dados gravados em um arquivo de entrada que foi denominado "*transporte.txt*".

A seguir são listados os três módulos do programa e o arquivo *transporte.txt* contendo os dados para o transporte para Congonhas.

A.2 Módulo main.cpp

```
#include <iostream>
#include <fstream>
#include "carga.h"
char* saída;
using std::cin; using std::cout; using std::endl;

int main()
{
    char* saída = "transporte.res"; char* entrada = "transporte.txt";
    char t; cin.clear();
    std::ofstream arq_s(saída);
    carga radio = carga(entrada,arq_s);
    radio.ocupacional(arq_s);
    for (int i = 0; i!= radio.fim; ++i)
    {
        if (radio.f[i] > 0.0){
            cout << "POPULAÇÃO ";
            arq_s << "POPULAÇÃO ";
            switch (i)
            {
            case 0 : cout << "URBANA" << endl << endl;
                    arq_s << "URBANA" << endl << endl;
                    radio.público_residente(radio.urbana,arq_s); break;
            case 1 : cout << "SUBURBANA" << endl << endl;
                    arq_s << "SUBURBANA" << endl << endl;
                    radio.público_residente(radio.suburbana,arq_s); break;
            case 2 : cout << "RURAL" << endl << endl;
                    arq_s << "RURAL" << endl << endl;
                    radio.público_residente(radio.rural,arq_s);
            }}}
        cout << endl ;
        cout << "Pressione qualquer tecla + ENTER para terminar e sair" << endl;
        cin >> t; return 0; }
```

A.3 Módulo carga. h

```
#ifndef GUARD_carga
#define GUARD_carga
#include <fstream>
#include <vector>
using std::vector;

class carga
{
public:
    enum zona { urbana, suburbana, rural , fim};
    enum posição {motorista, lateral, pilha};
    carga(char* entrada, std::ofstream& arq_s) {le_dados(entrada, arq_s);}
    void relatório(std::ofstream& arq_s);
    double integral(int zona);
    void le_dados(char* dados, std::ofstream& arq_s);
    double expoente(int n, int m);
    double d_quadrado(int i, int j, int k, int posição);
    double blindagem(int posição);
    void xe_ye_ze(int i, int j, int k, double& xe, double& ye, double& ze);
    void ocupacional(std::ofstream& arq_s);
    void público_residente(int zona, std::ofstream& arq_s);
    void t_dose_d2();
    void sentido_oposto(int zona, std::ofstream& arq_s);
    void mesmo_sentido(int zona, std::ofstream& arq_s);
    double quadrado(double a);
    void escreve(char nome, double u);
    double re, h, itr2, mix_iodo, mix_molib, dlat2, dm2, dmanuseio2;
    double tc, ntc, nttc, td, ntd, ntt, nvte, ntv, nttv;
    double d_total, mix;
    int nx, ny, nz, ne;
    vector<double> xpm, xpo, npvms, ymin, npvso;
    vector<double> dp, xmin, xmax, f, vm;
};
#endif
```

A.4 Módulo carga.cpp

```

#include <iostream>
#include <fstream>
#include "carga.h"
#include <cmath>
#include <string>
using namespace std;
const double ypilha = 0.4;
const double ymanuseio = 0.5;
const double dcab = 0.5;
double tdm,Itt,tdose_d2;
extern std::ofstream& arq_s;
double pi = 3.141593;
const double comp_veiculo = 5.0;
const double largura_da_pista = 2.5;
double s_Itt,s_d_It,s_re,sig_tc,sig_td;
double s_tdm_p,s2_tdose_d2,s_t_p,f_extra;
string nome;
using std::cout; using std::endl;
double carga::quadrado(double a)
{return a*a;}

void carga::le_dados(char* dados,std::ofstream& arq_s)
{
    std::ifstream arq(dados);
    if(!arq.good())
        throw std::domain_error("não encontrei o arquivo de dados de entrada");
    getline(arq,nome);
    arq >> re >> h >> nx >> nz >> ne >> nvvte;
    arq >> Itt >> s_Itt >> s_tdm_p >> s_d_It >> s_re;
    s_tdm_p /= 100.0;
    double s_tc_p,s_td_p;
    arq >> s_tc_p >> s_td_p >> s_t_p;
    s_tc_p /= 100.0; s_td_p /= 100.0; s_t_p /= 100.0;
    arq >> mix >> f_extra; arq >> tc >> ntc >> nttc;
    tc /= 3600.0; arq >> td >> ntd >> ntttd;
    td /= 3600.0; sig_tc = tc*s_tc_p;
    sig_td = td*s_td_p;
    arq >> ntv >> nttv;
    double a,b,c; arq >> d_total >> a >> b >> c;
    f.clear(); f.push_back(a);f.push_back(b);f.push_back(c);
    arq >> a >> b >> c;
    vm.clear(); vm.push_back(a);vm.push_back(b);vm.push_back(c);
    arq >> a >> b >> c; dp.clear();
    dp.push_back(a);dp.push_back(b);dp.push_back(c);
    double a1,b1,c1;

```

```

    arq >> a >> a1 >> b >> b1 >> c >> c1;
    xmin.clear(); xmax.clear();
    xmin.push_back(a);xmax.push_back(a1);
    xmin.push_back(b);xmax.push_back(b1);
    xmin.push_back(c);xmax.push_back(c1);
    xpm.clear(); npvms.clear(); ymin.clear();
    for (int i = 0; i!= fim; ++i)
    { arq >> a >> b >> c ;
      xpm.push_back(a); npvms.push_back(b); ymin.push_back(c);
    }
    xpo.clear(); npvso.clear();
    for (int i = 0; i!= fim; ++i)
    { arq >> a >> b ;
      xpo.push_back(a); npvso.push_back(b);}
    itr2 = Itt*(1.0+re)*(1.0+re)/ne;
    ny = ne/nx/nz; if (ny*nx*nz < ne) ++ny;
    dlat2 = (0.5 + 2.0*nx*re)*(0.5 + 2.0*nx*re)+ quadrado(ny*re)
            + quadrado(h);
    dm2 = quadrado(dcab+2.0*ny*re) + quadrado(re)+quadrado(h);
    dmanuseio2 = 2.0*quadrado(re)+quadrado(ymanuseio);
    relatório(arq_s);
}

double carga::expoente(int n, int m)
{ double valor = mix*(n-m);
  if(valor > 30) return 0.0;
  if(valor == 0) return 1.0;
  return exp(-1.0*valor); }

void carga::xe_ye_ze(int i,int j,int k,double& xe, double& ye,double& ze)
{ xe = (2.0*i-1.0)*re;
  ye = (2.0*j-1.0)*re;
  ze = (2.0*k-1.0)*h/2.0;}

double carga::d_quadrado(int i, int j, int k, int posição)
{
  // usa coordenadas predefinidas
  double x,y,z;
  // define posições para cálculo da distância até a superfície do embalado
  switch (posição)
  {
    case motorista: x = re; y = dcab+(2.0*ny)*re; z = h;
                    break;
    case lateral:   x = 2.0*nx*re +0.5; y = ny*re; z = h;
                    break;
    case pilha:    x = nx*re; y = ypilha + ny*re; z = nz*h;
                    break;
  }
}

```

```

    }

    double xe,ye,ze;
    xe_ye_ze(i,j,k,xe,ye,ze);
    return (quadrado(xe-x)+quadrado(ye-y)+quadrado(ze-z));
}

double carga::blindagem(int posição)
{
    int m,n,nj; double valor;
    double a,b,c;
    double atenuado = 0.0;
    switch (posição){
        case motorista: nj = ny; n = ny; break;
        case lateral:   nj = ny; n = nx; break;
        case pilha:    nj = ny/2;
                     if (2*nj < ny) ++nj;
                     n = nj;          }

    for (int k = 1; k!=nz+1; ++k)
    {
        { for (int i = 1; i!=nx+1; ++i)
          { for (int j = 1; j!=nj+1; ++j)
            { m = j;
              if (posição == lateral) m = i;
              a = expoente(n,m); b = d_quadrado(i,j,k,posição);
              c = a/b;
              atenuado += expoente(n,m)/d_quadrado(i,j,k,posição);
            } } }
    }
    return atenuado;
}

void carga::ocupacional(std::ofstream& arq_s)
{
    // tdtp = taxa de dose trabalhador entre pilhas
    double a = 10.0*blindagem(pilha);
    double tdtp = 2.0*itr2*a;
    double s2_itr2 = (quadrado(1.0+re)*s_Itt)
                    + quadrado(2.0*Itt)*(quadrado(s_d_It)+quadrado(s_re));
    s2_itr2 *= quadrado((1.0+re)/ne);
    double s2_tdtp = s2_itr2*quadrado(2.0*a);

    // taxa de dose trabalhador manuseio embalado um a um
    double b = 10.0*ne/dmanuseio2; double tdte = itr2*b;
    double s2_tdte = s2_itr2*quadrado(b);
    // Dose individual total: carga

```

```

double Dimc = (tdtp*ne+tdte)*tc;
double c = nvvte*ntc/nttc; Dimc *= c;
double s2_Dimc = (s2_tdtp + s2_tdte)*quadrado(c*tc)
                + quadrado(c*sig_tc*(tdtp*ne+tdte));
// Dose individual total: descarga
double Dimd = (tdtp*ne+tdte)*td;
Dimd *= c;
double s2_Dimd = (s2_tdtp + s2_tdte)*quadrado(c*td)
                + quadrado(c*sig_td*(tdtp*ne+tdte));
// Taxa de dose na cabine do veículo
tdm = 10.0*blindagem(motorista)*itr2;
if (f_extra > 0.0) tdm *= f_extra;
double s2_tdm = quadrado(tdm*s_tdm_p);
// Dose total média individual motorista
double soma = 0.0;
if (vm[urbana] > 0.0) soma += f[urbana]/vm[urbana];
if (vm[suburbana] > 0.0) soma += f[suburbana]/vm[suburbana];
if (vm[rural] > 0.0) soma += f[rural]/vm[rural];
double tempo = d_total*soma; double s2_t = quadrado(tempo*s_t_p);
a = nvvte*ntv/nttv; double Dimm = tdm*tempo*a;
double s2_Dimm = quadrado(a*tempo)*s2_tdm+quadrado(a*tdm)*s2_t;
double Dicdm = Dimc + Dimd + Dimm;
double s2_Dicdm = s2_Dimc + s2_Dimd + s2_Dimm;
double Dicdm_por_it = (Dimc*nttc + Dimd*nttd + Dimm*nttv)/Itt*nvvte;
double s2_Dicdm_por_it = (quadrado(nttc)*s2_Dimc
                        +quadrado(nttd)*s2_Dimd
                        + quadrado(nttv)*s2_Dimm)/quadrado(Itt*nvvte)
                        +quadrado(Dicdm_por_it*s_Itt/Itt);
cout << "Taxa de dose na cabine do motorista = " << tdm << " +- " <<
sqrt(s2_tdm) << " uSv/h" << endl;
cout << "Dose individual total nas operações de carga = " << Dimc << " +- " <<
sqrt(s2_Dimc) << " uSv" << endl;
cout << "Dose individual total nas operações de descarga = " << Dimd << " +- " <<
<< sqrt(s2_Dimd) << " uSv" << endl;
cout << "Dose média individual total motorista = " << Dimm << " +- " <<
sqrt(s2_Dimm) << " uSv" << endl;
cout << "Dose individual total transporte + carga + descarga = "
<< Dicdm << " +- " << sqrt(s2_Dicdm) << " uSv" << endl;
cout << "Tempo gasto em cada viagem = " << tempo << " h" << endl;
cout << "Tempo total anual de viagem = " << tempo*nvvte << " h " << endl;
cout << "Dose (transporte + carga + descarga) por " << endl;
cout << " unidade de índice de transporte = " << Dicdm_por_it
<< " +- " << sqrt(s2_Dicdm_por_it) << " uSv" << endl << endl << endl;
arq_s << "Taxa de dose na cabine do motorista = " << tdm << " +- " << sqrt(s2_tdm)
<< " uSv/h" << endl;
arq_s << "Dose individual total nas operações de carga = " << Dimc << " +- "
<< sqrt(s2_Dimc) << " uSv" << endl;

```

```

    arq_s << "Dose individual total nas operações de descarga = " << Dimd << " +-
" << sqrt(s2_Dimd) << " uSv" << endl;
    arq_s << "Dose média individual total motorista = " << Dimm << " +- " <<
sqrt(s2_Dimm) << " uSv" << endl;
    arq_s << "Dose individual total transporte + carga + descarga = "
    << Dicdm << " +- " << sqrt(s2_Dicdm) << " uSv" << endl;
    arq_s << "Tempo gasto em cada viagem = " << tempo << " h" << endl;
    arq_s << "Tempo total anual de viagem = " << tempo*nvvt << " h " << endl;
    arq_s << "Dose (transporte + carga + descarga) por " << endl;
    arq_s << " unidade de índice de transporte = " << Dicdm_por_it
    << " +- " << sqrt(s2_Dicdm_por_it) << " uSv" << endl << endl << endl;
    t_dose_d2();
}
void carga::t_dose_d2()
{
    double tdlat = 10.0*blindagem(lateral)*itr2;
    tdose_d2 = tdlat*dlat2;
    s2_tdose_d2 = quadrado(tdose_d2*s_tdm_p);
    if (tdlat*dlat2 < tdm*dm2 )
    {tdose_d2 = tdm*dm2;
    s2_tdose_d2 = quadrado(tdm*s_tdm_p);}
}

double carga::integral(int zona)
{
    double L = d_total*f[zona];
    double delta_x = (xmax[zona]-xmin[zona])/1.0e4;
    double soma = 0.0; double x = xmin[zona];
    while ( x < xmax[zona])
    {
        double u = L/x;
        soma += (u*atan(u)-0.5*log(1.0+u*u))*delta_x;
        x+= delta_x;}
    return soma;
}

void carga::escreve(char nome, double u)
{cout << nome << u << endl;}

void carga::público_residente(int zona ,std::ofstream& arq_s)
{
    double L = d_total*f[zona];
    double tempo = L/vm[zona];
    double pop = 2.0*dp[zona]*L*(xmax[zona]-xmin[zona]);
    double u = pi*tdose_d2*nvvt/vm[zona];
    double Di_min = u/2.0/xmax[zona];
    double a = s2_tdose_d2/quadrado(tdose_d2);
    double s2_Di_min = quadrado(Di_min*s_t_p) + quadrado(Di_min)*a;
}

```

```

double Di_max = u/xmin[zona];
double s2_Di_max = quadrado(Di_max*s_t_p)+ quadrado(Di_max)*a;;
double Dc_min = Di_min*pop;
double Dc_max = Di_max*pop;
double w = 2.0*nvte*dp[zona]*integral(zona)/vm[zona];
double Dc = w*tdose_d2;
double s2_Dc = quadrado(Dc*s_t_p)+ quadrado(w)*s2_tdose_d2;
double Dim = Dc/pop;
cout << "População residente" << endl;
cout << " Dose individual mínima = " << Di_min << " +- " << sqrt(s2_Di_min) << "
uSv" << endl;
cout << " Dose individual máxima = " << Di_max << " +- " << sqrt(s2_Di_max) << "
uSv" << endl;
cout << " Dose coletiva mínima = " << Dc_min << " +- " << sqrt(s2_Di_min)*pop
<<" uSv" << endl;
cout << " Dose coletiva máxima = " << Dc_max << " +- " << sqrt(s2_Di_max)*pop
<<" uSv" << endl;
cout << " Dose coletiva = " << Dc << " +- " << sqrt(s2_Dc) <<" uSv" << endl;
cout << " Dose individual média = " << Dim << " +- " << sqrt(s2_Dc)/pop <<"uSv"
<< endl;
cout << " População = " << pop << " habitantes " << endl <<endl;
arq_s << "População residente" << endl;
arq_s << " Dose individual mínima = " << Di_min << " +- " << sqrt(s2_Di_min) << "
uSv" << endl;
arq_s << " Dose individual máxima = " << Di_max << " +- " << sqrt(s2_Di_max) <<
" uSv" << endl;
arq_s << " Dose coletiva mínima = " << Dc_min << " +- " << sqrt(s2_Di_min)*pop
<<" uSv" << endl;
arq_s << " Dose coletiva máxima = " << Dc_max << " +- " << sqrt(s2_Di_max)*pop
<<" uSv" << endl;
arq_s << " Dose coletiva = " << Dc << " +- " << sqrt(s2_Dc) <<" uSv" << endl;
arq_s << " Dose individual média = " << Dim << " +- " << sqrt(s2_Dc)/pop <<"uSv"
<< endl;
arq_s << " População = " << pop << " habitantes " << endl <<endl;
mesmo_sentido(zona,arq_s);
sentido_oposto(zona,arq_s);
}
void carga::mesmo_sentido(int zona,std::ofstream& arq_s)
{
double L = d_total*f[zona]; double tempo = L/vm[zona];
double s2_t = quadrado(tempo*s_t_p); double a = quadrado(xpm[zona]);
double b = quadrado(ymin[zona]); double Dims_pp_max = tdose_d2*tempo/a;
double Dims_mp_max = tdose_d2*tempo/b; double u = (s2_tdose_d2+s2_t);
double ro = 2.0*npvms[zona]/(comp_veiculo + ymin[zona]);
double passageiros = L*ro; double Dims_max,s2_Dims_max;
if (Dims_mp_max > Dims_pp_max)
{Dims_max = Dims_mp_max; s2_Dims_max = u/quadrado(a);}
}

```

```

else
{Dims_max = Dims_pp_max; s2_Dims_max = u/quadrado(b);}
// coletiva mesma pista
double Dcms_mp = 1/ymin[zona] - 1/L;
// pista paralela
double Dcms_mp_pp = atan(L/xpm[zona])/xpm[zona];
// região urbana tem 2 pistas laterais
if (zona == urbana)
{ u = Dcms_mp + 2.0*Dcms_mp_pp;
  passageiros *= 3; }
else
{ u = Dcms_mp + Dcms_mp_pp; passageiros *= 2;}
double Dcms= u*tdose_d2*ro*tempo;
double s2_Dcms = quadrado(u*tdose_d2*ro)*s2_t
                + quadrado(u*ro*tempo)*s2_tdose_d2;
double Dim_ms = Dcms/passageiros;
double s2_Dim_ms = s2_Dcms/quadrado(passageiros);
cout << "Trafego no mesmo sentido" << endl;
cout << " Dose máxima individual = " << Dims_max << " +- " << sqrt(s2_Dims_max)
<< " uSv" << endl;
cout << " Dose individual média = " << Dim_ms << " +- " << sqrt(s2_Dim_ms) << "
uSv" << endl;
cout << " Dose coletiva = " << Dcms << " +- " << sqrt(s2_Dcms) << " uSv" << endl;
cout << " População = " << passageiros << " passageiros"
<< endl << endl;
arq_s << "Tráfego no mesmo sentido" << endl;
arq_s << " Dose máxima individual = " << Dims_max << " +- " <<
sqrt(s2_Dims_max) << " uSv" << endl;
arq_s << " Dose individual média = " << Dim_ms << " +- " << sqrt(s2_Dim_ms) << "
uSv" << endl;
arq_s << " Dose coletiva = " << Dcms << " +- " << sqrt(s2_Dcms) << " uSv" <<
endl;
arq_s << " População = " << passageiros << " passageiros"
<< endl << endl;
}
void carga::sentido_oposto(int zona,std::ofstream& arq_s)
{
double L = d_total*f[zona]; double tempo = L/vm[zona];
double s2_t = quadrado(tempo*s_t_p);
double ro = 2.0*npvso[zona]/(comp_veiculo + ymin[zona]);
double passageiros = L*ro;
// dose máxima : primeira pista (+ proxima)
double Diso_max = 2.0*tdose_d2/vm[zona]*atan(L/xpo[zona])/xpo[zona];
double s2_Diso_max = quadrado(Diso_max/tdose_d2)*s2_tdose_d2
                    + quadrado(Diso_max/tempo)*s2_t;
double u = 2.0*L/xpo[zona]; double a = (u*atan(u)-0.5*log(1+u*u))/L;
double Dc_pista_1 = tdose_d2*tempo*a;

```

```

double s2_Dc_p1 = quadrado(Dc_pista_1)*(s2_tdose_d2/quadrado(tdose_d2)
+ s2_t/quadrado(tempo));
u = 2.0*L/(xpo[zona]+largura_da_pista);
double b = (u*atan(u)-0.5*log(1+u*u))/L;
double Dc_pista_2 = tdose_d2*tempo*b;
double s2_Dc_p2 = quadrado(Dc_pista_2)*(s2_tdose_d2/quadrado(tdose_d2)
+ s2_t/quadrado(tempo));
double Dcso = ro*(Dc_pista_1 + Dc_pista_2);
double s_Dcso = ro*sqrt(s2_Dc_p1+s2_Dc_p2);
passageiros *= 2.0;
double Dimso = Dcso/passageiros; double s_Dimso = s_Dcso/passageiros;
cout << "Tráfego sentido oposto" << endl;
cout << " Dose individual máxima = " << Diso_max << " +- " << sqrt(s2_Diso_max)
<< " uSv" << endl;
cout << " Dose coletiva = " << Dcso << " +- " << s_Dcso << " uSv" << endl;
cout << " Dose individual média = " << Dimso << " +- " << s_Dimso << " uSv" <<
endl;
cout << " População = " << passageiros << " passageiros"
<< endl << endl << endl;
arq_s << "Tráfego sentido oposto" << endl;
arq_s << " Dose individual máxima = " << Diso_max << " +- " << sqrt(s2_Diso_max)
<< " uSv" << endl;
arq_s << " Dose coletiva = " << Dcso << " +- " << s_Dcso << " uSv" << endl;
arq_s << " Dose individual média = " << Dimso << " +- " << s_Dimso << " uSv" <<
endl;
arq_s << " População = " << passageiros << " passageiros"
<< endl << endl << endl;
}
void carga::relatorio(std::ofstream& arq_s)
{
cout << "DOSES RESULTANTES DO TRANSPORTE DE RADIOFÁRMACOS" << endl
<< endl;
cout << "Arranjo: " << nx << " x " << ny

<< " x " << nz << endl << endl;
arq_s << nome << endl << endl;
arq_s << "DOSES RESULTANTES DO TRANSPORTE DE RADIOFÁRMACOS" << endl
<< endl;
arq_s << "Arranjo: " << nx << " x " << ny
<< " x " << nz << endl << endl;
arq_s << "Raio do embalado = " << re << " m " << endl;
arq_s << "Altura do embalado = " << h << " m " << endl;
arq_s << "Espessura efetiva de blindagem = " << mix << " cm " << endl;
arq_s << "Fator de atenuação extra cabine = " << f_extra << endl;
arq_s << "Número total de embalados = " << ne << endl;
arq_s << "Índice de transporte total = " << Itt << endl;
arq_s << "Número total de viagens = " << nvvte << endl;

```

```

arq_s << "Tempo gasto na operação de carga = " << tc << " h" << endl;
arq_s << "Número de trabalhadores na operação de carga = " << ntc << endl;
arq_s << "Número de trabalhadores disponíveis para a operação de carga = " << nttc
<< endl;
arq_s << "Tempo gasto na operação de descarga = " << td << " h" << endl;
arq_s << "Distância trabalhador-pilha (eixo y) = " << ypilha << " m" << endl;
arq_s << "Número de trabalhadores na operação de descarga = " << ntd << endl;
arq_s << "Número de trabalhadores disponíveis para a operação de descarga = " <<
nttd << endl;
arq_s << "Número de tripulantes no veículo = " << ntv << endl;
arq_s << "Número de tripulantes disponíveis = " << nttv << endl;
arq_s << "Distância total percorrida = " << d_total << endl ;
arq_s << "Comprimento dos veículos = " << comp_veiculo << " m" << endl;
arq_s << "Largura das pistas = " << largura_da_pista << " m" << endl << endl;

for (int i = 0; i!= fim; ++i)
{
    arq_s << endl;
    switch (i)
    {
        case urbana: arq_s << "Zona urbana: " << endl; break;
        case suburbana: arq_s << "Zona suburbana: " << endl; break;
        case rural: arq_s << "Zona rural: " << endl;
    }
    if (f[i] > 0.0)
    {
        arq_s << " Fração da distância percorrida = " << f[i] << endl;
        arq_s << " Velocidade média = " << vm[i] << " m/h" << endl;
        arq_s << " Densidade populacional da zona urbana = " << dp[i] << " hab/m2" <<
endl;
        arq_s << " Distância mínima indivíduo-veículo = " << xmin[i] << " m" << endl;
        arq_s << " Distância máxima indivíduo-veículo = " << xmax[i] << " m" << endl;
        arq_s << " Distância entre pistas (mesmo sentido) = " << xpm[i] << " m" << endl;
        arq_s << " Número de passageiros por veículo (mesmo sentido) = " << npvms[i] <<
endl;
        arq_s << " Número de passageiros por veículo (sentido oposto) = " << npvso[i] <<
endl;
        arq_s << " Distância entre pistas (sentido oposto) = " << xpo[i] << " m" << endl
<< endl;

    }
}
arq_s << endl << endl;
arq_s << "DOSES OCUPACIONAIS" << endl << endl;
cout << "DOSES OCUPACIONAIS" << endl << endl;
};

```

A.5 Arquivo de entrada de dados "transporte.txt"

Destino = Congonhas c/ blindagem adicional

0.15 0.4 4 2 35 365

29.3 1.3 10.2 0.10 0.02

10.0 10.0 10.0

5.0 0.74

25 1 8

25 1 8

1 8

15000 0.10 0.90 0.0

15000 15000 0.0

0.08 0.008 0.001

1.0 5.0 5.0 20.0 20.0 100.0

2.5 2 1.5

3.0 2 15.0

3.0 2 50.0

3.0 2

3.0 2

3.0 2

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Turns 40, Supplement of the IAEA Bulletin**, Vienna, 1957.
- [2] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGIA ATOMICA. **Asociación entre el Organismo Internacional de Energia Atómica y la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo y la Paz**. OIEA, Viena, 1995.
- [3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Regulations for the safe transport of radioactive material**, IAEA, Vienna, 1961a (Safety Series No. 6).
- [4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Notes on certain aspects of the regulations**, IAEA, Vienna, 1961b (Safety Series No. 7).
- [5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Regulations for the safe transport of radioactive material, Edition Revised**. IAEA, Vienna, 1964 (Safety Series No. 6).
- [6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Regulations for the safe transport of radioactive material**. IAEA, Vienna, 1967 (Safety Series No. 6).
- [7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Regulations for the safe transport of radioactive material, Edition Revised** IAEA, Vienna, 1973 (Safety Series No. 6).
- [8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Regulations for the safe transport of radioactive material, Edition Revised, 1973 (As Amended 1979)**, IAEA, Vienna, 1979 (Safety Series No. 37).

- [9] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Advisory material for the application of the IAEA transport regulations**, IAEA, Vienna, 1973b (Safety Series No. 37).
- [10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Advisory material for the IAEA regulations for the safe transport of radioactive material, 2. Edition**. IAEA, Vienna, 1982 (Safety Series No. 37).
- [11] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Regulations for the safe transport of radioactive material, Edition Revised (As Amended), 1985 Edition**. IAEA, Vienna, 1985 (Safety Series No. 6).
- [12] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Advisory material for the IAEA regulations for the safe transport of radioactive material, 3 Edition**. IAEA, Vienna, 1987 (Safety Series No. 37).
- [13] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Schedules of requirements for the transport of specific types of radioactive material consignments**. IAEA, Vienna, 1987 (Safety Series No. 80).
- [14] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Explanatory material for the IAEA regulations for the safe transport of radioactive material, (1985 Edition), 2. Edition**. IAEA, Vienna, 1987 (Safety Series No. 7).
- [15] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Regulations for the safe transport of radioactive material, Edition Revised, 1985 Edition. Supplement 1988**. IAEA, Vienna, 1988 (Safety Series No. 6).

- [16] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Regulations for the safe transport of radioactive material, 1996 Edition**. IAEA, Vienna, 1996 (No. TS-R-1, ST – 1).
- [17] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Regulations for the safe transport of radioactive material, 1996 Edition Revised**. IAEA, Vienna, 2000 (No. TS-R-1, ST-1, Revised).
- [18] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Regulations for the safe transport of radioactive material, 1996 Edition Revised (As Amended)**. IAEA, Vienna, 2003 (No. TS-R-1, ST-1, Revised).
- [19] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Regulations for the safe transport of radioactive material, 2005 Edition**. IAEA, Vienna, 2005 (No. TS-R-1, ST-1, Revised).
- [20] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Advisory material for the IAEA regulations for the safe transport of radioactive material**. IAEA, Vienna, 2002 (TS-G-1.1, ST-2).
- [21] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Diretrizes básicas de radioproteção - CNEN-NN – 3.01**. Rio de Janeiro: 2005.
- [22] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **International studies on certain aspects of the transport of radioactive material, 1980-1985**. IAEA, Vienna, 1986 (TECDOC-375).

- [23] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Recommendations of the international commission on radiological protection.** ICRP, Vienna, 1977 (Publication 26).
- [24] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Limits for intakes of radionuclides by workers.** ICRP, Vienna, 1980 (Publication 30).
- [25] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Transporte de materiais radioativos - CNEN-NE – 5.01.** Rio de Janeiro: 1988.
- [26] POPE, R.B.; McCLURE, J.D. **Estimated annual worldwide shipments of radioactive material.** In: PACKAGING AND TRANSPORTATION OF RADIOACTIVE MATERIALS, 1987, Vienna. Proceedings of symposium Vienna:IAEA, 1987. (IAEA STI/PUB/718, IAEA, Vienna (1987) 459-468).
- [27] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources.** IAEA, Vienna, 1996 (Safety Series No. 115).
- [28] WATSON, S.J., OATWAY, W.B., JONES, A.L., HUGHES, J.S. **Survey into the radiological impact of the normal transport of radioactive material in the UK by road and rail.** Rep. NRPB-W66, National Radiological Protection Board, Chilton, UK, 2005.
- [29] SHAPIRO, J., **Exposure of airport workers to radiation from shipments of radioactive material: a review of studies conducted at six major airports.** Rep. NUREG-0154, United States Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, 1977.

- [30] SCHWARZ, G., FETT, H.J., LANGE, F. **”Occupational and public exposures arising from the normal transport of radioactive material: Experience in Germany”**. SAFETY OF TRANSPORT OF RADIOACTIVE MATERIAL INTERNATIONAL CONFERENCE. IAEA, Vienna, 2005.
- [31] ROCKWELL, T. **Reactor shielding design manual**, D. Van Nostrand, Princeton, N.J., 1956.
- [32] HEILBRON FILHO, P.F.L. **Impacto esperado no transporte dos embalados de Goiânia**. Relatório técnico. CNEN, Rio de Janeiro, 1990.