INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA EMBALADO DE TRANSPORTE DE Mo-99

DÉBORA HARUMI SUZUKI HARA

Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Materiais.

Orientador:

Prof. Dr. Jesualdo Luiz Rossi

São Paulo

2015

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA EMBALADO DE TRANSPORTE DE Mo-99

DÉBORA HARUMI SUZUKI HARA

Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Materiais.

Orientador:
Prof. Dr. Jesualdo Luiz Rossi

São Paulo
2015

*Dedico este trabalho à minha família,
ao Victor e à Mulita, por serem
essenciais.*

AGRADECIMENTOS

Este trabalho só pôde ser concluído devido ao auxílio, carinho e amizade de pessoas as quais eu devo meus mais sinceros agradecimentos:

Ao Dr. Jesualdo Luiz Rossi pela disposição, motivação e paciência na orientação deste trabalho. Agradeço também por me dar a oportunidade de conhecer tantas outras pessoas e lugares e pela oportunidade de angariar tanto conhecimento nessa empreitada.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) por suas instalações e todo seu pessoal, sempre prestativo e solícito.

Ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (POLI-USP), pela disponibilização do programa CES Edupack.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela concessão da bolsa, realizada por meio do processo nº 50/2012 do edital Pró-Estratégia.

À Marina Fiore, pelo auxílio na utilização do programa CES Edupack.

Ao Prof. Dr. Frederico Antônio Genezini, pelas discussões, pelos ensinamentos e pelo auxílio na utilização dos programas ESTAR e XCOM.

Aos pesquisadores: Dr. Cristiano Stefano Mucsi, Dr. Luis Gallego Martinez, Dr. Rodolfo Politano, Dra. Ana Maria Gordon, Dra. Isolda Costa e Dr. Frank Ferrer Sene, pelo auxílio, pelas discussões, pelos ensinamentos e pela motivação.

Aos funcionários do IPEN: Ana Cláudia Martinelli Feher, Ana Maria Maiorino, Ana Paula Bertoni, Bruna Roque da Silva, Doralice Lima Xavier, Marco Antônio Oliveira Silva, Marion Calado, Roberto Frajndlich, Romério Lourenço Barbosa, Sueli Zambo Perillo e Waldir Ferreira, por todo o suporte e auxílio durante a execução deste trabalho.

Aos meus amigos e companheiros do IPEN: Juliana, Rosana, Raquel, Felipe, Francisco e Igor, pelo apoio, pelo auxílio e pelas discussões.

Aos meus amigos: Marina, Maurizio, Juliana, Gabriel, Lumi, Maira e Patê, por todo o apoio e por tornarem a vida mais leve e divertida.

Ao Victor, pelo auxílio, pelo apoio, pela motivação, pelas discussões e por todo o

companheirismo, carinho e paciência durante essa jornada.

À toda a minha família, especialmente à minha mãe, por me inspirar a ser sempre uma pessoa melhor. Agradeço por todo incentivo, apoio, ensinamentos, paciência, esforço, auxílio e o amor incondicional. Agradeço também à família do Victor, por ter me acolhido e por todo o carinho sempre.

"A diferença entre o sonho e a realidade é a quantidade certa de tempo e trabalho."

William Douglas

SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA EMBALADO DE TRANSPORTE DE Mo-99

Débora Harumi Suzuki Hara

RESUMO

O transporte de materiais radioativos deve ser realizado em embalados capazes de suportar tanto condições normais, quanto acidentais de transporte. O objetivo deste trabalho foi a seleção de materiais que possam viabilizar a fabricação de um embalado para o transporte de substâncias que sejam fontes de alta radioatividade, em especial o Mo-99, cujo produto do decaimento radioativo é o Tc-99m, utilizado para fins diagnósticos na medicina nuclear. Para tanto, foi realizada a seleção dos possíveis materiais que podem ser utilizados para a fabricação de um embalado, com o auxílio do programa CES EduPack e a metodologia desenvolvida por Ashby. O programa ESTAR foi utilizado para verificar a ocorrência de radiação de freamento e o programa XCOM para o cálculo do coeficiente de atenuação da radiação gama de alguns dos materiais selecionados para compor a blindagem do embalado. Posteriormente, a espessura necessária para a blindagem da radiação foi calculada. A partir dos resultados obtidos, os materiais selecionados como candidatos potenciais para a fabricação da blindagem foram as ligas de tungstênio. Com relação à parte do embalado que oferece isolamento térmico e proteção ao impacto, destacam-se as madeiras, os aglomerados e os compensados. No que concerne ao revestimento interno e externo, os materiais selecionados se concentram nos aços.

MATERIAL SELECTION FOR A TRANSPORTATION PACKAGE OF Mo-99

Débora Harumi Suzuki Hara

ABSTRACT

The transport of radioactive materials must be done in packages able to withstand both normal and accidental conditions of transport. The aim of this work was the material selection that can enable the manufacture of a package for the transport of substances which are of high radioactivity sources, especially Mo-99, whose radioactive decay product is Tc-99m, used for diagnosis purposes in nuclear medicine. For this, the selection of possible materials that can be used for the manufacture of the main parts of the package was performed with the aid of CES Edupack program and the methodology developed by Ashby. The ESTAR program was used to check occurrence of *Bremsstrahlung* and the XCOM program was used to calculate the attenuation coefficient of gamma radiation from some of the selected materials for the shield. After, the thickness needed for the radiation shielding was calculated. From the results, the materials selected as potential candidates for the manufacture of the shielding was the tungsten alloys. Related to the thermal insulation and the impact protection, woods, plywoods and particleboards stand out. With regard to internal and external recipients, the selected materials focus on steels.

SUMÁRIO

	<i>Página</i>
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 OBJETIVO	3
2.1 Objetivos específicos	3
CAPÍTULO 3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	4
3.1 Radioatividade	4
3.2 Decaimentos nucleares	5
3.3 Atividade de uma amostra	7
3.4 Penetração das radiações na matéria	7
3.5 Proteção radiológica	8
3.5.1 Blindagem de radiação α e β	9
3.5.2 Blindagem de radiação λ	10
3.6 Radioisótopos	13
CAPÍTULO 4 RADIOFÁRMACOS	14
4.1 Importância do par Mo-99/ Tc-99m	16
4.2 Produção e crise do Mo-99	17
4.3 Reator Multipropósito Brasileiro - RMB	18
CAPÍTULO 5 TRANSPORTE DE MATERIAIS RADIOATIVOS	19
5.1 Regulamentação no Brasil	19
5.2 Norma CNEN-NE-5.01	20
5.2.1 Classificação dos materiais radioativos	20
5.2.2 Limitação de atividade	22
5.2.3 Seleção do tipo de embalado	22
5.2.4 Requisitos de projeto	23
5.2.5 Ensaios para aceitação	24
CAPÍTULO 6 EMBALADOS TIPO B	26

CAPÍTULO 7 MATERIAIS E MÉTODOS	30
7.1 Tabela comparativa – Lista RAMPAC	31
7.2 Seleção de materiais	31
CAPÍTULO 8 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
8.1 Tabela comparativa - Lista RAMPAC	38
8.2 Seleção de materiais	42
8.2.1 Blindagem	42
8.2.2 Proteção térmica/impacto	50
8.2.3 Recipiente externo	60
8.2.4 Recipiente interno	66
CAPÍTULO 9 CONCLUSÕES	67
CAPÍTULO 10 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	69
ANEXO - Ensaios para embalados	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

LISTA DE FIGURAS

	<i>Página</i>
FIGURA 1. Foto de embalado fabricado pela empresa <i>MDS Nordion</i> e utilizado no Centro de Radiofarmácia (CR) do IPEN.	2
FIGURA 2. Esquema representativo do fenômeno de decaimento nuclear ^[10] .	5
FIGURA 3. Imagem ilustrando o nível de penetração dos diferentes tipos de radiação, na matéria ^[10] .	8
FIGURA 4. Esquema representativo do efeito fotoelétrico ^[12] .	11
FIGURA 5. Esquema representativo do efeito Compton ^[12] .	11
FIGURA 6. Esquema representativo do efeito da produção de pares ^[12] .	12
FIGURA 7. Probabilidade de ocorrência dos diversos processos de interação dos fótons com a matéria, em função da energia do fóton e do número atômico do material absorvedor ^[12] .	12
FIGURA 8. Exemplo de imagem obtida por cintilografia óssea convencional. Nota-se um acúmulo do radioisótopo na região da bexiga ^[15] .	15
FIGURA 9. Exemplo de imagem obtida por tomografia computadorizada (SPECT) de um cérebro ^[16] .	15
FIGURA 10. Incorporação preferencial de radioisótopos nos tecidos e órgãos do corpo humano, em função do tipo de composto utilizado, para produção em imagens para diagnósticos em medicina nuclear ^[12] .	16
FIGURA 11. Esquema de decaimento do Mo-99.	17
FIGURA 12. Esquema representativo da cadeia de produção do Mo-99.	17

FIGURA 13. Classificação dos materiais radioativos para fins de transporte.	21
FIGURA 14. Classificação dos tipos de embalados segundo a Norma CNEN-NE-5.01.	22
FIGURA 15. Modelo 4001A/ Nome do embalado: SAFSHIELD ^[21] , (a) imagem e (b) vista em corte do embalado.	26
FIGURA 16. Modelo 2835A/ Nome do embalado: SAFKEG ^[22] , (a) imagem e (b) vista em corte do embalado.	27
FIGURA 17. Nome do embalado: F-327/ F-245 ^[23, 24] , (a) imagem e (b) esquema ilustrativo do embalado.	27
FIGURA 18. (a) Fotografia e (b) vista em corte de embalado tipo B produzido pela empresa <i>Glove-Box GANUK GmbH</i> . O modelo é designado pelo fabricante como GA-01.	29
FIGURA 19. Procedimento utilizado no desenvolvimento do trabalho.	30
FIGURA 20. O fluxograma de projeto. Partindo dos requisitos de projeto são encontradas três etapas para se chegar a especificação do produto: conceito, corporificação e detalhe.	32
FIGURA 21. Imagem da janela do software CES Edupack, apresentando o gráfico da densidade. Na extremidade inferior esquerda, nota-se uma lista com os materiais encontrados.	33
FIGURA 22. O fluxograma da seleção de materiais.	34
FIGURA 23. Imagem da janela inicial do programa ESTAR.	35
FIGURA 24. Gráfico obtido para o poder de freamento gerado no decaimento do Mo-9.	35
FIGURA 25. Imagem da janela inicial do programa XCOM.	36
FIGURA 26. Gráfico obtido para o coeficiente de atenuação γ do chumbo.	37
FIGURA 27. Esquema ilustrativo apresentando as principais partes constituintes de um embalado do Tipo B.	39

- FIGURA 28. O fluxograma apresenta os requisitos considerados para a seleção de materiais para a blindagem. 43
- FIGURA 29. O gráfico apresenta todos os materiais encontrados na base de dados do programa CES Edupack, organizados pelo valor da densidade. 44
- FIGURA 30. Gráfico dos resultados obtidos quando fixado o limite inferior de densidade. O espectro contínuo em cinza se refere aos materiais que foram excluídos da seleção. 45
- FIGURA 31. Aumento da área circular da FIG.30, apresentando alguns dos materiais que figuram como candidatos à utilização na blindagem do embalado. 45
- FIGURA 32. Gráfico dos resultados obtidos quando fixados os limites de densidade e do coeficiente de expansão térmica 46
- FIGURA 33. Aumento da área circular da FIG.32, apresentando alguns dos materiais que figuram como candidatos à utilização na blindagem do embalado, após o segundo refinamento. 47
- FIGURA 34. Valores de densidade em relação ao preço de mercado (valores constantes no banco de dados), apresentando alguns dos materiais que figuram como candidatos à utilização na blindagem do embalado. 47
- FIGURA 35. O fluxograma apresenta os requisitos considerados para a seleção de materiais para a proteção térmica/impacto. 50
- FIGURA 36. O gráfico apresenta todos os materiais encontrados na base de dados do programa CES Edupack, organizados pelo valor da condutividade térmica. 50
- FIGURA 37. Gráfico dos resultados obtidos quando fixado o limite superior de condutividade térmica. O espectro contínuo em cinza se refere aos materiais que foram excluídos da seleção. Na figura, estão destacados alguns dos materiais que constam nos embalados descritos na lista *RAMPAC*. 51
- FIGURA 38. Gráfico que relaciona a condutividade térmica e o módulo de Young, dos resultados obtidos quando fixado o limite superior de condutividade térmica. 52

FIGURA 39. Gráfico que relaciona a condutividade térmica e o módulo de Young, dos resultados obtidos quando fixado os limites superiores da condutividade térmica e do módulo de Young. 53

FIGURA 40. Gráfico que relaciona a condutividade térmica e o módulo de Young, dos resultados obtidos quando fixado os limites superior da condutividade térmica, superior do módulo de Young e inferior do limite de escoamento 54

FIGURA 41. Gráfico que relaciona a condutividade térmica e a densidade, dos resultados obtidos quando fixado os limites superior da condutividade térmica, superior do módulo de Young, inferior do limite de escoamento e superior da densidade 55

FIGURA 42. Gráfico que relaciona o coeficiente de expansão térmica e a densidade, dos resultados obtidos quando fixado os limites superior da condutividade térmica, superior do módulo de Young, inferior do limite de escoamento, superior da densidade e superior do coeficiente de expansão térmica 56

FIGURA 43. Valores de densidade em relação ao preço de mercado (valores constantes no banco de dados), apresentando alguns dos materiais que figuram como candidatos à utilização para a proteção térmica/impacto do embalado. 57

FIGURA 44. O fluxograma apresenta os requisitos considerados para a seleção de materiais para recipiente externo. 60

FIGURA 45. Gráfico dos resultados obtidos quando fixado o limite inferior de temperatura máxima de trabalho. O espectro contínuo em cinza se refere aos materiais que foram excluídos da seleção. 60

FIGURA 46. Aumento da área circular da FIG.46, apresentando alguns dos materiais que figuram como candidatos à utilização para o recipiente externo do embalado, após fixado o limite inferior da temperatura máxima de trabalho. 61

FIGURA 47. Gráfico que relaciona a tensão de ruptura com o módulo de Young, dos resultados obtidos quando fixado o limite inferior de temperatura máxima de trabalho. 62

FIGURA 48. Gráfico que relaciona a tensão de ruptura com o módulo de Young, dos resultados obtidos quando fixados o limites inferiores de temperatura máxima de trabalho, tensão de ruptura e módulo de Young. 63

FIGURA 49. Aumento da área circular da FIG.49, apresentando alguns dos materiais que figuram como candidatos à utilização para o recipiente externo do embalado, após fixado os limites inferiores de temperatura máxima de trabalho, tensão de ruptura e módulo de Young. 63

FIGURA 50. Mesmo gráfico da FIG.50, após excluído o grupo dos materiais cerâmicos. 64

FIGURA 51. Valores de densidade em relação ao preço de mercado (valores constantes no banco de dados), apresentando alguns dos materiais que figuram como candidatos à utilização para o recipiente externo do embalado. 65

FIGURA 52. O fluxograma apresenta os requisitos considerados para a seleção de materiais para o recipiente interno. 66

LISTA DE TABELAS

	<i>Página</i>
TABELA 1. Comparação dos materiais que compõem as quatro partes principais de um embalado tipo B(U) ^[24] .	39
TABELA 2. Valores obtidos da energia da radiação de freamento emitida no decaimento do Mo-99. Os valores da tabela são valores arredondados.	43
TABELA 3. Valores obtidos de HVL e TVL utilizando-se os coeficientes fornecidos pelo programa XCOM.	49
TABELA 4. Madeiras encontradas na seleção de materiais para a função de proteção térmica/impacto. Estão presentes as regiões em que podem ser encontradas ^[34] .	58
TABELA I. Distância de queda livre para ensaio de embalados em condições normais de transporte.	71

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

O Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) é a instituição pioneira na produção de radioisótopos e radiofármacos no Brasil ^[1]. Tais compostos são produzidos com qualidade controlada para administração em seres humanos, na forma de fármacos injetáveis, destinados ao diagnóstico mais preciso de exames e para uso em terapia de inúmeras patologias e disfunções (radioterapia). São tratados aproximadamente seis mil pacientes por dia com estes produtos ^[2].

Atualmente, o radionuclídeo mais importante para a preparação de radiofármacos com finalidade diagnóstica é o tecnécio-99m (Tc-99m) ^[3], produto do decaimento radioativo do molibdênio-99 (Mo-99). Existem, no momento, cinco reatores nucleares responsáveis por fornecer 85% do Mo-99 utilizado em todo mundo, os quais se encontram no Canadá, França, Bélgica, África do Sul e Holanda ^[4]. Isso mostra o quão frágil é o fornecimento deste radionuclídeo devido à concentração de sua produção; no caso do Brasil, não há outra forma de obtenção que não pela importação, uma vez que não há reatores capazes de produzir o elemento em questão.

Em maio de 2009, a empresa canadense *MDS Nordion*, responsável por aproximadamente 40% do fornecimento mundial de Mo-99, interrompeu suas atividades, após o reator nuclear que lhe fornecia o radionuclídeo apresentar falhas durante a operação ^[5]. O evento provocou uma crise no mercado de radiofármacos, afetando principalmente suas aplicações em medicina nuclear. No início de 2014, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e a Sociedade Brasileira de Medicina Nuclear (SBMN) discutiram outra possível crise no fornecimento de Mo-99, prevista para ocorrer em 2016 ^[4, 6, 7].

Com este cenário, o Brasil se prepara para enfrentar a possível crise no abastecimento de Mo-99; para tanto, está investindo em um projeto que pretende tornar o país independente na produção deste radionuclídeo: o Reator Multipropósito Brasileiro (RMB). Este reator tem o intuito de tornar o país independente na produção de isótopos radioativos para a medicina e pesquisa em áreas como energia, agricultura e materiais. O desenvolvimento deste projeto está sendo feito pela CNEN e sua construção deve ser

realizada em um terreno cedido em parte pelo Centro Tecnológico da Marinha de São Paulo (CTMSP) e em parte pelo governo do Estado de São Paulo ^[4].

Neste contexto, é de grande importância o desenvolvimento de um embalado de transporte de substâncias radioativas, em especial o Mo-99, o qual deve ser transportado do local em que este é produzido até o local em que ocorre seu fracionamento. É de interesse que este embalado seja produzido com recursos e tecnologia nacionais.

A FIG.1 mostra uma foto de um modelo de embalado produzido pela *MDS Nordion*, empresa citada anteriormente.

FIGURA 1. Foto de embalado fabricado pela empresa MDS Nordion e utilizado no Centro de Radiofarmácia (CR) do IPEN.

É importante salientar que os embalados utilizados no IPEN são de propriedade do fabricante e seu uso ocorre em regime de comodato, ou seja, transfere-se apenas a posse de um bem, mas não seu domínio. Dessa forma, com a construção e operação do RMB, haverá a necessidade de fabricação de um embalado para atender a demanda de transporte dos radionuclídeos produzidos no Brasil, uma vez que os embalados atualmente utilizados não estarão disponíveis para tal finalidade.

CAPÍTULO 2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é a seleção de materiais que possam viabilizar a fabricação de um embalado para o transporte de substâncias radioativas, em especial o Mo-99, cujo produto do decaimento é utilizado para fins diagnósticos na medicina nuclear.

2.1 Objetivos específicos

Este trabalho envolve as seguintes etapas, que caracterizam os objetivos específicos:

- 1) descrição de um dos embalados encontrados no Centro de Radiofarmácia do IPEN, bem como a comparação das principais partes - recipiente interno, blindagem, proteção térmica/impacto e recipiente externo - deste embalado com as de outros existentes;
- 2) seleção dos possíveis materiais que podem ser utilizados para a fabricação do embalado, com auxílio do programa CES EduPack e da metodologia desenvolvida por Ashby^[8];
- 3) cálculo do poder de freamento por radiação e do coeficiente de atenuação da radiação gama dos materiais selecionados para compor a blindagem do embalado, utilizando-se o programa ESTAR e XCOM, respectivamente; e
- 4) comparação das espessuras necessárias para os materiais selecionados para compor a blindagem do embalado.

CAPÍTULO 3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Para o desenvolvimento do projeto, a apresentação de conceitos teóricos e a compreensão dos fenômenos envolvidos são de extrema importância, uma vez que este assunto exige conhecimentos aprofundados em física, química, ciências dos materiais, medicina nuclear, entre outros.

3.1 Radioatividade

A radioatividade é um fenômeno físico-químico pelo qual algumas substâncias são capazes de emitir radiações, as quais apresentam propriedades peculiares como a capacidade de impressionar placas fotográficas, ionizar gases, produzir fluorescência, atravessar a matéria, destruir células tumorais, entre outras.

Foi observada pela primeira vez em 1896, pelo cientista francês *Henri Becquerel* que guardou uma amostra de óxido de urânio em uma gaveta que continha algumas placas fotográficas e ficou surpreso ao ver que o composto de urânio havia escurecido as placas, apesar de elas terem sido cobertas com um material opaco. *Becquerel* percebeu que o composto devia estar emitindo algum tipo de radiação ^[9].

Marie Skłodowska Curie, uma jovem estudante polonesa que preparava seu doutorado, mostrou que a radiação, que ela chamou de radioatividade, era emitida pelo urânio, independente do composto em que ele estava. Ela concluiu que os átomos de urânio eram a fonte da radiação. Juntamente com seu marido, *Pierre*, ela continuou a trabalhar e mostrou que o tório, o rádio e o polônio também eram radioativos ^[9].

A origem dos raios foi inicialmente um mistério, porque a existência dos núcleos atômicos era desconhecida até aquele momento. Porém, em 1898, *Ernest Rutherford* deu o primeiro passo para a descoberta de sua origem, quando identificou três diferentes tipos de radioatividade, as radiações alfa (α), beta (β) e gama (γ), ao observar o efeito de campos elétricos sobre as emissões radioativas. As descobertas de *Becquerel*, *Curie* e *Rutherford* mostraram que a radioatividade é produzida pelo decaimento nuclear, a decomposição parcial de um núcleo. A mudança de composição de um núcleo é chamada de reação nuclear ^[9].

3.2 Decaimentos nucleares

Os decaimentos nucleares ocorrem sempre que o núcleo de um determinado elemento se encontra em um estado de alta energia. Dessa forma, por ter excesso de energia, o núcleo tende a estabilizar-se emitindo algumas partículas ou fótons (ondas eletromagnéticas). A FIG.2 representa um esquema ilustrativo do fenômeno.

FIGURA 2. Esquema representativo do fenômeno de decaimento nuclear ^[10].

Dcaimento alfa (α ou ${}^4_2\text{He}$)

Um dos processos de estabilização de um núcleo com excesso de energia é o da emissão de um grupo de partículas, constituídas por dois prótons e dois nêutrons, e da energia a elas associada ^[10].

O decaimento α ocorre comumente em núcleos cujo número atômico é maior que $Z=82$. Durante o processo, um núcleo pai instável decai nos núcleos filhos através da emissão de um núcleo de hélio (${}^4_2\text{He}$). Tal fenômeno ocorre espontaneamente, porque ele é favorecido por questões de energia ^[11]. A emissão α representa transições com energias bem definidas e, portanto, com valores discretos (não contínuo) ^[12]. Um exemplo desse tipo de decaimento está apresentado a seguir, o rádio-226 decai para radônio-222, emitindo uma partícula α .

Dcaimento beta (β^- ou β^+)

Outro tipo de decaimento nuclear é o decaimento β , que é definido como a emissão ou absorção espontânea de um elétron ou pósitron por um núcleo ^[12]. Esta

forma de estabilização ocorre quando existe no núcleo um excesso de nêutrons ou de prótons.

Quando existe no núcleo um excesso de nêutrons em relação a prótons, a estabilização se dá através da emissão de uma partícula negativa (β^-) e, no caso de existir excesso de prótons, é emitida uma partícula positiva, chamada pósitron (β^+). O cézio-137 sofre decaimento do tipo β^- e produz bário-137, conforme descrito a seguir.

A energia da radiação β é caracterizada por um espectro contínuo, ou seja, um valor variando de 0 até um valor máximo - característico de cada elemento ^[13].

Decaimento gama (γ)

O terceiro tipo de decaimento nuclear não sofre interferências ou desvios em presença de cargas elétricas e é denominado decaimento γ .

O decaimento γ é a emissão espontânea de fótons de alta energia pelo núcleo de um elemento, por ocasião de uma transição entre um estado excitado para um estado de energia inferior ^[11]. Geralmente, após a emissão de radiação α ou β , o núcleo resultante desse processo (ainda com excesso de energia) procura estabilizar-se, emitindo o excesso de energia em forma de onda eletromagnética. O bário-137 metaestável, ao emitir um fóton, se estabiliza e se torna bário-137, por exemplo (conforme mostrado a seguir).

A energia da radiação γ , assim como descrito para a radiação α , apresenta também transições com energias bem definidas. Entretanto, de um estado excitado podem ocorrer uma ou mais transições para os estados excitados de menor energia ou para o estado fundamental; como a soma das probabilidades de transição é 1 (100%), o percentual de emissão de cada radiação γ é diretamente proporcional à probabilidade da ocorrência da transição envolvida. Esse percentual é denominado de Intensidade Relativa de Emissão γ (I_R) ^[12].

3.3 Atividade de uma amostra

A atividade de uma amostra corresponde à taxa de transformações que um dado elemento pode sofrer com o tempo, ou seja, é a média do número de emissões por segundo que um elemento é capaz de irradiar. A atividade pode ser calculada através da EQ.1, apresentada a seguir:

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad \text{EQUAÇÃO 1}$$

Na EQ. 1, $A(t)$ representa a atividade final da amostra, A_0 é a atividade inicial, λ é a constante de decaimento (característica de um dado radionuclídeo, definida como a probabilidade de decaimento por átomo, por segundo) e t é o tempo.

A unidade para a medição da atividade de um material é dada por *Becquerel (Bq)*, que corresponde a uma desintegração por segundo. Outra unidade muito utilizada é o *Curie (Ci)*, que equivale a $3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$.

3.4 Penetração das radiações na matéria

Considera-se radiação ionizante qualquer partícula ou onda eletromagnética que, ao interagir com a matéria, “arranca” elétrons dos átomos ou de moléculas, transformando-os em íon, direta ou indiretamente. Assim, as partículas α e β e a radiação γ , emitidas por fontes radioativas, bem como os raios X emitidos pelos respectivos aparelhos, são caracterizados como radiações ionizantes.^[10]

A FIG.3 fornece exemplos do comportamento de algumas radiações, em contato com a matéria. Vale ressaltar que a figura apenas fornece uma ideia geral da profundidade de penetração, não levando em consideração características como espessura, composição ou densidade do material.

FIGURA 3. Imagem ilustrando o nível de penetração dos diferentes tipos de radiação, na matéria. ^[10]

3.5 Proteção radiológica

A proteção radiológica visa evitar ou reduzir os efeitos maléficos das radiações ionizantes, sejam de origem natural ou de fontes produzidas artificialmente. Tais objetivos podem ser alcançados seguindo-se os três princípios básicos de radioproteção – Princípio da Justificação, Princípio da Otimização e Princípio da Limitação da Dose Individual – prescritos pela norma CNEN-NN-3.01 "Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica" ^[12].

O Princípio da Justificação estabelece que qualquer atividade envolvendo radiação ou exposição a radiações deve ser justificada em relação a possíveis alternativas e deve produzir um benefício para a sociedade.

O Princípio da Otimização versa sobre a utilização e manuseio de materiais radioativos, os quais devem ser realizados de forma a garantir que as exposições às radiações sejam tão baixas quanto razoavelmente exequíveis.

Por fim, o Princípio da Limitação da Dose Individual estabelece que as doses individuais de indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE's) e de indivíduos do público não devem exceder os limites anuais presentes na norma CNEN-NN-3.01.

Em princípio, a radiação emitida por uma determinada fonte pode ser reduzida por meio do controle de três parâmetros: tempo, distância e blindagem ^[12].

Tempo: A dose acumulada por um indivíduo exposto a uma fonte radioativa é diretamente proporcional ao tempo de exposição. Para pessoas que trabalham com materiais radioativos ou fontes de radiação, o tempo de permanência na área de trabalho deve ser o menor possível para a realização da tarefa necessária ^[12].

Distância: Para uma fonte de radiação puntiforme, a taxa de dose é inversamente proporcional ao quadrado da distância existente entre um indivíduo e a fonte. Assim, dobrando-se a distância entre o indivíduo e a fonte, a taxa de dose é reduzida a um quarto de seu valor inicial. Um exemplo da aplicação deste conceito é a utilização de pinças para manipulação de materiais radioativos ou fontes de radiação, que minimiza a taxa de dose recebida pelo organismo de um indivíduo ocupacionalmente exposto ^[12].

Blindagem: Por vezes, a redução do tempo de exposição e/ou o aumento da distância necessária para a manipulação de materiais radioativos não é suficiente para garantir a dose máxima permitida recebida por um trabalhador. Nesse caso, a blindagem fornece uma forma confiável de limitar esta dose, por meio de materiais capazes de barrar ou atenuar as radiações incidentes ^[12].

3.5.1 Blindagem de radiação α e β

Partículas carregadas dissipam energia nas colisões com as partículas dos átomos do material de blindagem ^[12]. O espaço percorrido por uma partícula carregada até que sua energia cinética entre em equilíbrio térmico com as partículas do meio é denominado alcance. Então, para que ocorra a blindagem dessas partículas, o material deve apresentar uma espessura maior do que seu alcance (neste material).

O poder de penetração da partícula α é muito pequeno, devido a sua massa ser relativamente maior, quando comparada à partícula emitida no decaimento β . Observa-se que o alcance da partícula α é menor para materiais mais densos ^[12].

A radiação β , por ser uma partícula de massa muito pequena (quando comparada à partícula α), apresenta duas radiações potencialmente ionizantes: partículas β e radiação de freamento (também conhecido como, *Bremsstrahlung*, do alemão). Quando partículas β interagem com o campo elétrico de núcleos de número atômico elevado, elas reduzem a energia cinética e mudam de direção, emitindo a diferença de energia da

colisão em forma de ondas eletromagnéticas denominadas raios X de freamento. Para minimizar a produção dessa radiação, o material da blindagem deve apresentar um valor baixo de número atômico (Z) ^[13].

Em uma blindagem projetada para uma fonte emissora de radiação β , a radiação de freamento é aquela que apresenta o risco mais significativo, para fins de projeto. Enquanto a partícula β pode ser blindada através de uma espessura maior do que seu alcance, a blindagem utilizada no caso da radiação de freamento deve ser analisada da mesma maneira que a radiação γ , como descrito a seguir.

3.5.2 Blindagem de radiação γ

Devido ao seu caráter ondulatório, a radiação γ pode penetrar em um material percorrendo grandes espessuras antes de sofrer a primeira interação ^[12]. Por se tratar de uma onda eletromagnética, a radiação γ não é passível de ser barrada; neste caso, o termo correto para descrever a forma de blindagem é atenuação. Isso significa que, para este tipo de radiação, a intensidade da energia do fóton incidente é reduzida a níveis aceitáveis de dose, mas não pode ser completamente eliminada.

O grau de atenuação da radiação γ é dependente de quatro fatores principais: da energia da radiação incidente, do número atômico e da densidade dos elementos que compõem o material de blindagem e da espessura da blindagem. ^[13] A atenuação da radiação γ pode ser descrita pela EQ.2:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad \text{EQUAÇÃO 2}$$

Na equação apresentada (EQ.2), I é a intensidade da radiação após passar pela blindagem, I_0 é a intensidade inicial da radiação, μ é o coeficiente de atenuação total e x é a espessura da blindagem.

O coeficiente de atenuação μ representa a probabilidade da radiação sofrer atenuação e depende da interação da radiação com a matéria, que se dá por meio de três processos principais: efeito fotoelétrico, efeito *Compton* e produção de pares, que serão explicados adiante. Assim, o coeficiente de atenuação total de um material é dado pela soma dos coeficientes de atenuação de cada processo, como apresentado na EQ.3:

$$\mu = \mu_f + \mu_c + \mu_p$$

EQUAÇÃO 3

Na EQ.3, μ_f é o coeficiente de atenuação devido ao efeito fotoelétrico, μ_c é o coeficiente de atenuação devido ao efeito *Compton* e μ_p se refere ao coeficiente de atenuação devido à produção de pares.

Efeito fotoelétrico: é caracterizado pela transferência total da energia da radiação a um único elétron orbital, o qual é expelido com uma energia cinética bem definida. Este efeito é predominante para baixas energias e para elementos de elevado número atômico ^[12]. A FIG.4 apresenta um esquema representativo (modelo simplificado) do fenômeno.

FIGURA 4. Esquema representativo do efeito fotoelétrico ^[12].

Efeito *Compton*: é caracterizado pela transferência parcial da energia da radiação a um elétron de baixa energia de ligação, resultando em um elétron expelido e em um fóton com a energia remanescente, como pode ser visto na FIG.5.

FIGURA 5. Esquema representativo do efeito Compton ^[12].

Produção de pares: este efeito ocorre quando fótons de energia superior a 1,022 MeV passam perto de núcleos de número atômico elevado, interagindo com o forte campo elétrico nuclear e resultando na produção de um par elétron-pósitron, como ilustrado na FIG.6 ^[12].

FIGURA 6. Esquema representativo do efeito da produção de pares ^[12].

É importante ressaltar que a probabilidade de ocorrência de cada um desses fenômenos varia de acordo com a natureza do elemento (número atômico - Z) e da energia do fóton incidente, conforme pode ser visto na FIG.7.

FIGURA 7. Probabilidade de ocorrência dos diversos processos de interação dos fótons com a matéria, em função da energia do fóton e do número atômico do material absorvedor ^[12].

3.6 Radioisótopos

Os radioisótopos são isótopos que apresentam atividade radioativa, ou seja, emitem radiação. Isótopos são elementos que apresentam o mesmo número atômico, porém massas diferentes; assim sendo, exibem estabilidades diferentes.

O uso da energia nuclear e das radiações é muito pouco divulgado, entretanto é enorme a gama de aplicações ^[10], conforme descrito a seguir.

Geração de energia elétrica: a conversão da energia nuclear para energia elétrica ocorre em reatores nucleares, onde a fonte de calor é o urânio-235. A grande vantagem na geração de energia elétrica através deste método é a enorme quantidade de energia produzida a partir de pouco material físsil.

Medicina nuclear: os radioisótopos são utilizados tanto em diagnósticos como em terapias. Como exemplo, têm-se o uso de iodo-131, que é ingerido por um paciente para diagnóstico de tireóide; quanto à aplicação em terapias pode-se citar a utilização de samário-153, que é injetado em pacientes com metástase óssea, como paliativo para a dor.

Traçadores radioativos: possibilitam o estudo do comportamento de alguns animais (e.g., insetos, abelhas e formigas) e do metabolismo das plantas, verificando o que necessitam para crescer, quais as substâncias absorvidas e onde um determinado elemento químico fica retido.

Gamagrafia industrial: a prática consiste na aplicação de radioisótopos para identificação de defeitos, falhas e possíveis fraturas em um equipamento, através da radiografia de peças metálicas. A gamagrafia consiste na impressão de radiação gama em um filme fotográfico.

Preservação de alimentos por irradiação: consiste na exposição de alimentos à radiação ionizante. Esta técnica de preservação de alimentos é interessante, pois não altera as características do alimento, aumenta sua durabilidade e não produz resíduos tóxicos.

CAPÍTULO 4 RADIOFÁRMACOS

Os radiofármacos são isótopos radioativos utilizados na medicina nuclear, para o diagnóstico mais preciso e para o tratamento de patologias ou disfunções. Podem ser definidos como sendo substâncias que, por sua forma farmacêutica, quantidade e qualidade de radiação emitida por um radioisótopo constituinte, são utilizadas em diagnósticos e terapias, independente da forma ou via de administração (intravenosa, oral, inalação, entre outras) ^[3].

A forma farmacêutica se refere ao estado que a substância ativa em um medicamento apresenta após ser submetido a operações farmacêuticas; estas são realizadas a fim de facilitar a forma de administração no paciente e também para potencializar o efeito desejado. Quanto às formas possíveis, podem ser encontrados medicamentos sólidos (cápsulas, comprimidos), drágeas, semi-sólidos (pomadas, cremes, géis, aerossóis) e líquidos (soluções, xaropes). Com relação à via de administração, esta pode ser realizada através de via oral, via cutânea, via nasal, entre outras.

Quando a finalidade é terapêutica, ou seja, para o tratamento de doenças, o efeito da radiação é utilizado na destruição de células tumorais. Nesse caso, os radiofármacos são compostos por radionuclídeos emissores de radiação beta e/ou gama, que possuem pequeno poder de penetração, mas são altamente energéticas, ionizando o meio que atravessam e causando uma série de efeitos que resultam na morte de células tumorais ^[3].

A radioterapia é uma especialidade médica que usa radiação ionizante para remover do corpo do paciente uma porção de tecido (lesão), por indução de morte celular. Isso pode ser feito externamente ao corpo do paciente, com a fonte de radiação afastada, o que é chamado de teleterapia, ou com o uso de fontes radioativas seladas colocadas muito próximas da lesão, podendo ser inseridas no corpo do paciente, na modalidade braquiterapia ^[14].

Para diagnóstico de doenças, são produzidas imagens através da emissão de radiação gama pelos tecidos que, por se tratar de uma onda eletromagnética, apresenta alta penetrabilidade nos tecidos junto a um baixo poder de ionização (quando comparada

às radiações particuladas). A radiação é detectada por um equipamento que fornece dados para a conversão e formação da imagem obtida, como pode ser visto na FIG.8.

FIGURA 8. Exemplo de imagem obtida por cintilografia óssea convencional. Nota-se um acúmulo do radioisótopo na região da bexiga ^[15].

A FIG. 9 apresenta outro exemplo de diagnóstico por imagem, obtido através da tomografia computadorizada (*Single Photon Emission Computed Tomography - SPECT*). Tanto a cintilografia convencional quanto a tomografia computadorizada utilizam a detecção da radiação gama para a formação da imagem diagnóstica; entretanto, na cintilografia convencional, as imagens obtidas se encontram em duas dimensões (2D), enquanto na tomografia computadorizada podem ser obtidas imagens em três dimensões (3D) ou cortes transversais de partes selecionadas.

FIGURA 9. Exemplo de imagem obtida por tomografia computadorizada (SPECT) de um cérebro ^[16].

A FIG. 10 apresenta uma ilustração com alguns radiofármacos utilizados na medicina nuclear, bem como estão indicados seus respectivos órgãos ou tecidos de incorporação preferencial.

FIGURA 10. Incorporação preferencial de radioisótopos nos tecidos e órgãos do corpo humano, em função do tipo de composto utilizado, para produção em imagens para diagnósticos em medicina nuclear ^[12].

4.1 Importância do par Mo-99 /Tc-99m

Atualmente, um dos radionuclídeos mais importantes para a preparação de radiofármacos com finalidade diagnóstica é o tecnécio-99 metaestável (Tc-99m), o qual apresenta características físicas ideais para utilização em medicina nuclear diagnóstica, por ser mono-emissor gama de baixa energia (140 keV), possuir tempo de meia-vida físico relativamente curto (a cada intervalo de 6,02 horas a atividade de uma amostra decai pela metade) e não emitir radiação do tipo particulada. Essas características físicas, em conjunto, possibilitam a aquisição de imagens com excelente resolução, sem comprometimento dosimétrico para o paciente ^[3].

O Tc-99m é produto do decaimento radioativo do molibdênio-99 (Mo-99). Aproximadamente 87,5% dos átomos de Mo-99 de uma amostra desintegram-se por emissão de radiação β e originam núcleos de Tc-99m que, por sua vez, desintegram-se por emissão de radiação γ para originar o Tc-99. A FIG.11 apresenta um esquema para o decaimento do Mo-99.

FIGURA 11. Esquema de decaimento do Mo-99.

O período de meia-vida do Tc-99m é longo o suficiente para realizar um estudo completo, com concentrações adequadas, para os órgãos a serem analisados, mas também curto o suficiente para manter a mínima dosimetria possível ao paciente. Isso garante a remoção do radionuclídeo, seja pela excreção ou pelo decaimento nuclear ^[17].

4.2 Produção e crise do Mo-99

O Mo-99 pode ser produzido em ciclotrons e em reatores nucleares. Nos reatores, a produção do Mo-99 pode ser realizada por meio da fissão de U-235 (urânio-235) ou pela irradiação de alvos, com nêutrons térmicos, contendo Mo natural. O Mo-99 também pode ser obtido em ciclotrons, por meio do bombardeamento de Mo natural ou Mo-100, com prótons ^[18].

A FIG.12 apresenta um esquema ilustrativo com as etapas envolvidas na cadeia de produção do Mo-99, bem como uma breve explicação de cada etapa a seguir.

FIGURA 12. Esquema representativo da cadeia de produção do Mo-99.

Em uma primeira etapa, o Mo-99 é produzido nos reatores, por meio de um dos processos descritos anteriormente. Na etapa seguinte, o produto obtido nos reatores é enviado às instalações de processamento (processadores), responsáveis pela adequação

do Mo-99 produzido. Na terceira etapa, o Mo-99 é enviado aos geradores, que realizam o fracionamento e a disposição do radiofármaco nos geradores de tecnécio. Posteriormente, os geradores de tecnécio são transportados aos hospitais e clínicas para utilização em exames diagnósticos sendo, finalmente, utilizado nos consumidores finais da cadeia, os pacientes.

Existem, no momento, cinco reatores responsáveis por fornecer 85% do Mo-99 utilizado em todo mundo, os quais se encontram no Canadá, França, Bélgica, África do Sul e Holanda ^[4]. Em maio de 2009, a empresa canadense *MDS Nordion*, responsável por 40% do fornecimento mundial de Mo-99 (o dado leva em consideração a produção e fornecimento daquele período), interrompeu suas atividades após o reator que lhe fornecia o radioisótopo apresentar defeitos durante sua operação ^[5]. O evento provocou uma crise no mercado de radiofármacos, afetando principalmente suas aplicações em medicina nuclear. No início de 2014, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e a Sociedade Brasileira de Medicina Nuclear (SBMN) discutiram outra possível crise no fornecimento de Mo-99, prevista para ocorrer em 2016 ^[4, 6, 7].

4.3 Reator Multipropósito Brasileiro - RMB

O Brasil se prepara para enfrentar a possível crise no abastecimento de Mo-99; para tanto, está investindo em um projeto que pretende tornar o país independente na produção deste radionuclídeo: o Reator Multipropósito Brasileiro (RMB). Hoje, não há outra forma de obtenção do radioisótopo que não pela importação, uma vez que não há reatores capazes de produzir o elemento em questão.

Atualmente, o país gasta anualmente mais de R\$ 30 milhões com a importação de radioisótopos para a produção de radiofármacos. O custo orçado para a construção do reator é de aproximadamente R\$ 1 bilhão – calculado com base em instalações semelhantes construídas recentemente em outros países – valor este que seria amortizado ao longo de 20 anos pela sua utilização. A vida útil estimada do reator é de 50 anos ^[19].

O RMB objetiva dotar o país de uma infraestrutura estratégica de suporte ao desenvolvimento autônomo de atividades do setor nuclear, buscando a autossuficiência na produção de radioisótopos e fontes radioativas utilizadas nas mais diversas áreas, como medicina nuclear, indústria, agricultura e meio ambiente ^[19].

CAPÍTULO 5 TRANSPORTE DE MATERIAIS RADIOATIVOS

O desenvolvimento da indústria nuclear, a partir da década de 1950, e a consequente movimentação de materiais radioativos entre países, apontaram a necessidade de elaboração de normas e a assinatura de acordos internacionais, de modo a garantir a segurança no transporte, armazenamento em trânsito e manuseio desses materiais considerados perigosos.

No caso específico de materiais radioativos, o trabalho é coordenado pela Agência Internacional de Energia Atômica (*International Atomic Energy Agency - IAEA*), que instituiu a "Regulamentação para o Transporte Seguro de Materiais Radioativos". Essa regulamentação é destinada a todos os governos e a todas as organizações internacionais, para o desenvolvimento de suas próprias regulamentações para o transporte de produtos perigosos.

5.1 Regulamentação no Brasil

De acordo com a Constituição da República Federativa do Brasil de 1988, em seu art. 177, constituem monopólio da União: V – a pesquisa, a lavra, o enriquecimento, o reprocessamento, a industrialização e o comércio de minérios e minerais nucleares e seus derivados, com exceção dos radioisótopos cuja produção, comercialização e utilização poderão ser autorizadas sob regime de permissão, conforme as alíneas *b* e *c* do inciso XXIII do caput do art. 21 desta Constituição Federal (redação dada pela Emenda Constitucional nº49, de 2006). Mais, de acordo com o art. 21, compete à União no quesito de segurança, a responsabilidade civil por danos nucleares: “a responsabilidade civil por danos nucleares independe da existência de culpa” ^[20] (incluída pela Emenda Constitucional nº49, de 2006).

No Brasil, o principal órgão responsável pela regulamentação do transporte de materiais radioativos e nucleares é a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), que estabelece normas de controle para as atividades relativas ao transporte destes materiais.

5.2 Norma CNEN-NE-5.01

A lógica da Norma repousa na premissa de que os embalados contendo material radioativo devem ser tratados com os mesmos cuidados adotados para outros produtos perigosos, sendo que a segurança depende, basicamente, do projeto do embalado e não dos procedimentos operacionais ^[21].

Para tanto, com relação ao transporte de materiais radioativos, são estabelecidos requisitos de radioproteção e segurança a fim de garantir um nível adequado de controle da eventual exposição de pessoas, bens e meio ambiente à radiação ionizante, compreendendo: especificações sobre materiais radioativos para transporte, seleção do tipo de embalado, especificação dos requisitos de projeto e de ensaios de aceitação de embalados, entre outros ^[22].

Neste ponto é importante lembrar que o presente trabalho visa a seleção de materiais que viabilizem a fabricação de um embalado a ser utilizado no transporte de Mo-99; assim, devido a sua extensão, a Norma será abordada apenas no que concerne ao embalado selecionado para o transporte deste radionuclídeo. Serão apresentados seus requisitos de projeto bem como os ensaios a que devem ser submetidos para sua aceitação.

5.2.1 Classificação dos materiais radioativos

Para fins de transporte, material radioativo é definido como qualquer material que espontaneamente emite radiação ionizante e tem uma atividade específica superior a 70 kBq/kg (ou aproximadamente 2×10^{-9} Ci/g) ^[22]. Os materiais que apresentam valor inferior ao citado, e em que a atividade essencial é uniformemente distribuída, não são regulados para fins de transporte. Na FIG.13 está esquematizada a classificação dos materiais radioativos, segundo a Norma CNEN-NE-5.01.

Legenda:

A₁ - valor básico da atividade de um radionuclídeo no caso de se tratar de material radioativo sob forma especial.

A₂ - valor básico da atividade de um radionuclídeo no caso de não se tratar de material radioativo sob forma especial.

OCS (Objeto Contaminado na Superfície) - objeto sólido de material não radioativo com contaminação por material radioativo, distribuído na sua superfície.

BAE (Baixa Atividade Específica) - material radioativo que tem, por natureza, uma atividade específica limitada ou material radioativo ao qual se aplicam limites para a sua atividade específica média estimada.

Outros materiais - fontes radioativas líquidas (usadas geralmente na medicina nuclear e em pesquisas) e demais fontes radioativas sólidas e gasosas não seladas, isto é, que não passaram ou não foram submetidas aos testes específicos para fontes seladas.

FIGURA 13. Classificação dos materiais radioativos para fins de transporte.

Para este trabalho, utilizou-se a forma usualmente encontrada na importação do insumo Mo-99 para o Brasil, ou seja, a forma líquida. Entretanto, o Mo-99 também pode ser encontrado na forma sólida, não selada. No sistema de classificação apresentado acima, ambas as formas estão incluídas na categoria A₂ (outros materiais).

5.2.2 Limitação de atividade

O limite de atividade é calculado através da utilização dos valores básicos de atividade, A_1 e A_2 . Estes, são estabelecidos levando-se em consideração um trabalhador, em transporte, que permanece por 30 minutos a um metro da superfície do embalado. A determinação do limite de atividade do conteúdo radioativo é realizada para selecionar o tipo primário de embalado a ser utilizado em seu transporte. Para o caso específico do Mo-99, tem-se os valores de 0,9 TBq e 0,5 TBq, para A_1 e A_2 respectivamente.

5.2.3 Seleção do tipo de embalado

Da Norma, um embalado é definido como sendo um volume apresentado para transporte, abrangendo embalagem e respectivo conteúdo radioativo ^[22].

O tipo do embalado, com vistas ao desempenho adequado da respectiva embalagem em termos de sua integridade, deve ser selecionado dentre um dos quatro tipos primários, cada um com subtipos, como pode ser visto na FIG.14:

Legenda:

EI - Embalado Industrial

B (U) - Embalado do Tipo B com aprovação unilateral

B (M) - Embalado do Tipo B com aprovação multilateral

FIGURA 14. Classificação dos tipos de embalados segundo a Norma CNEN-NE-5.01.

Dadas as definições presentes na Norma ^[22] e partindo-se da forma usualmente encontrada na importação do insumo Mo-99 para o Brasil, fez-se a seleção do tipo de embalado a ser utilizado para o transporte deste radionuclídeo, levando-se em

consideração os cálculos do limite de atividade e as características da embalagem, para cada caso.

Para a seleção, o embalado do tipo industrial foi excluído, uma vez que este tipo pode conter apenas material BAE ou OCS. No caso do embalado exceptivo, o limite de atividade para transporte de Mo-99 no estado líquido é de $10^{-3} A_2$, o que equivale a 5.10^{-4} TBq. Para o embalado do Tipo A, tem-se que o limite de atividade é do próprio valor de A_2 , equivalente a 0,5 TBq. Por fim, o embalado do Tipo B não apresenta valores pré-estabelecidos de limite de atividade; estes, são definidos de acordo com os certificados de aprovação de cada projeto.

Com relação às características da embalagem, esta pode ser comercial comum (industrial), industrial reforçada, Tipo A (projetada para suportar condições normais de transporte) ou Tipo B (projetada para suportar tanto condições normais quanto acidentais de transporte).

Dessa forma, visando a contenção de Mo-99 e considerando que este deve ser transportado do local em que é produzido ao local em que ocorre seu fracionamento, o embalado adequado a tal fim é o embalado do Tipo B. Os embalados deste tipo, em conformidade com o que estiver autorizado e especificado nos certificados de aprovação dos respectivos projetos, não devem conter: **(a)** atividades superiores, **(b)** radionuclídeos diferentes, **(c)** forma diferente ou **(d)** conteúdo em estado físico ou químico diferente daqueles autorizados.

5.2.4 Requisitos de projeto

Como dito anteriormente, o embalado compreende a embalagem e o conteúdo radioativo. De forma geral, os requisitos de projeto se referem à embalagem e a sua capacidade de conter o conteúdo radioativo durante o manuseio e o transporte do embalado, tanto em condições normais quanto em acidentes.

A embalagem consiste em um conjunto de componentes necessários para encerrar completamente o conteúdo radioativo, podendo consistir de um ou mais invólucros ou recipientes, materiais absorventes, estruturas para espaçamento, blindagem para radiações e dispositivos para absorção de choques mecânicos e para isolamento térmico ^[22].

De acordo com a Norma, são estabelecidos requisitos gerais de projeto, os quais devem ser atendidos em qualquer tipo de embalado e, adicionalmente, requisitos específicos para cada tipo de embalado apresentado no item anterior (FIG.14). Neste tópico, serão apresentados os requisitos considerados fundamentais na concepção do projeto de um embalado.

Os embalados devem ser projetados de modo que: **a)** sejam fácil e seguramente manuseáveis e transportáveis, levando-se em consideração a massa, o volume e a forma dos mesmos; **b)** possam ser adequadamente fixados no meio de transporte; **c)** a integridade da contenção dos embalados não deve diminuir quando submetida a temperaturas ambientes variando de -40 °C a +55 °C.

Para o propósito deste trabalho foi selecionado o embalado Tipo B; esse embalado, com conteúdo radioativo limitado de acordo com o que estiver autorizado e especificado nos certificados de aprovação dos respectivos projetos, deve ser projetado de modo a: **a)** levar em conta, para os componentes da embalagem, a faixa de temperatura de -40 °C a +70 °C, com particular atenção aos pontos de congelamento do conteúdo radioativo líquido e à degradação potencial de materiais da embalagem, dentro deste intervalo de temperatura; **b)** continuar capacitado, após ser submetido aos ensaios prescritos na norma, ao cumprimento sem falhas dos requisitos aplicáveis de contenção e blindagem; **c)** levar em consideração os efeitos de calor capazes de:

- I – alterar o arranjo, a forma geométrica ou o estado físico do conteúdo radioativo ou, caso o material radioativo esteja contido em um recipiente metálico (elementos combustíveis de reator nuclear, por exemplo), causar a fusão ou deformação do recipiente ou do material radioativo; ou
- II – reduzir a eficiência da embalagem por dilatação térmica diferencial ou por fissuramento ou fusão do material da blindagem contra radiação; ou
- III – em combinação com umidade, acelerar a corrosão.

5.2.5 Ensaios para aceitação

Para verificar o atendimento aos requisitos de projeto presentes na Norma, o embalado deve ser submetido a alguns ensaios para demonstrar a capacidade de resistência do embalado, tanto em condições normais quanto acidentais de transporte.

De acordo com a Norma, as amostras devem ser submetidas aos seguintes ensaios, exigidos para demonstrar a capacidade de resistência em condições normais de transporte:

- a)** ensaio de jato de água;
- b)** ensaio de queda livre;
- c)** ensaio de empilhamento; e
- d)** ensaio de penetração.

Adicionalmente, para os embalados do Tipo B, as amostras devem ser submetidas aos efeitos cumulativos resultantes dos ensaios apresentados a seguir, exigidos para demonstrar a capacidade de resistência em condições acidentais de transporte:

- a)** ensaio mecânico (três ensaios de queda livre distintos);
- b)** ensaio térmico; e
- c)** ensaio de imersão em água.

Uma descrição pormenorizada de cada um dos ensaios citados consta no ANEXO. Os ensaios devem ser realizados na ordem indicada, devendo ser utilizada uma única amostra para os ensaios mecânico e térmico. Para o ensaio de imersão, pode ser utilizada a mesma amostra ou uma amostra distinta, devendo ser levada em consideração a integridade da amostra, que pode ser totalmente comprometida após ser submetida ao ensaio térmico.

CAPÍTULO 6 EMBALADOS TIPO B

Os embalados capazes de realizar o transporte de substâncias radioativas devem ser projetados respeitando-se as normas e regulamentação exigidas em lei, bem como atender a alguns requisitos estruturais necessários, como alta resistência ao impacto, baixa (ou nula) inflamabilidade, capacidade de contenção da radiação, entre outros. A blindagem da radiação em embalados é de fundamental importância no que concerne à segurança do transporte de material radioativo.

Existem diversos modelos de embalados. Todos devem assegurar a segurança no manuseio e transporte do conteúdo radioativo em situações rotineiras e, em circunstâncias não esperadas (acidentes), devem ser capazes de assegurar a integridade do conteúdo, para que não ocorram vazamentos e contaminações.

A FIG.15 mostra, respectivamente, uma fotografia (FIG.15a) e a vista em corte (FIG.15b) de um embalado Tipo B produzido por uma empresa denominada *Croft Associates Limited* (multinacional com sede no Reino Unido). Este embalado apresenta documentação aprovada para o transporte de três elementos: Co-60 (1110 TBq), Cs-137 (3780 TBq) e Ir-192 (3000 TBq).

(a)

(b)

FIGURA 15. Modelo 4001A/ Nome do embalado: SAFSHIELD^[23], (a) fotografia e (b) vista em corte do embalado.

A FIG.16 mostra, respectivamente, uma fotografia (FIG. 16a) e a vista em corte (FIG. 16b) de outro embalado do Tipo B produzido pela empresa *Croft Associates Limited*. Este embalado apresenta documentação aprovada para o transporte de Ir-192 (370 TBq).

FIGURA 16. Modelo 2835A/ Nome do embalado: SAFKEG^[24], (a) fotografia e (b) vista em corte do embalado.

A FIG.17 mostra, respectivamente, uma fotografia (FIG.17a) e um esquema ilustrativo (FIG.17b) de um embalado do Tipo B produzido pela empresa MDS Nordion (multinacional com sede no Canadá). Este embalado apresenta documentação aprovada para o transporte de I-131 (7500 GBq), Mo-99/Tc-99m (37 TBq), Co-60 (275 GBq) e Ir-192 (300 TBq). Para cada tipo de radionuclídeo a ser transportado, existe uma montagem diferente das partes que podem compor o embalado final.

FIGURA 17. Nome do embalado: F-327/ F-245^[25, 26], (a) fotografia e (b) esquema ilustrativo do embalado.

Um dos modelos encontrados atualmente no Centro de Radiofarmácia (CR) do IPEN é fornecido por uma empresa alemã, denominada *Glove-Box GANUK GmbH*. O modelo é designado pelo fabricante como GA-01 e é definido como projeto de embalado do Tipo B. Para o desenvolvimento deste trabalho, teve-se acesso a documentação do embalado, uma vez que, para a importação e transporte do Mo-99 ao Brasil, a empresa fornecedora do insumo deve fornecer tais informações para a empresa receptora. A descrição do modelo GA-01 é realizada a seguir.

Projeto do embalado

O projeto do embalado de transporte GA-01 cumpre com os requisitos de um embalado de transporte do tipo B(U), de acordo com a Regulamentação para a Segurança no Transporte de Material Radioativo da AIEA (*IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, 2005 Edition, §§650 to 664*) e com o certificado de teste do Conselho Federal Alemão de Testes de Materiais e Pesquisa (*German Federal Board of Material Testing and Research, Berlin*).

Conteúdo permitido

Molibdênio-99 com produto de decaimento sendo o tecnécio-99m na forma líquida, em solução de Na_2MoO_4 , em solução 0,2 molar, com NaNO_3 de aditivo.

Volume máximo: 50 mL

Atividade máxima: 81,4 TBq

Descrição do embalado

O recipiente de transporte cilíndrico consiste em um revestimento exterior, que envolve todo o embalado, para a absorção de choque (colisão) e um recipiente blindado que, por sua vez, contém um recipiente interno. Para conteúdo radioativo na forma líquida, é utilizado um frasco de aço inoxidável contido em um recipiente selado de aço inoxidável. Para todos os tipos de conteúdo que necessitem de encapsulamento impermeabilizável (vedada), é utilizado um recipiente blindado, composto por uma liga de tungstênio, uma tampa de vedação de aço inoxidável parafusada e dois anéis de vedação *Viton*. Uma base (*pallet*) de alumínio é permanentemente fixada na base do recipiente de transporte, como parte do embalado, para fins de manuseio (manipulação)

e segurança no transporte.

Dimensões e peso

Altura: 599 mm

Diâmetro: 416 mm

Largura da palheta: 700 mm

Peso (carregado): 250 kg

A FIG.18a mostra uma fotografia e a FIG.18b apresenta a vista em corte do embalado GA-01, retirada da documentação fornecida pelo CR-IPEN.

FIGURA 18. **(a)** Fotografia e **(b)** vista em corte de embalado tipo B produzido pela empresa Glove-Box GANUK GmbH. O modelo é designado pelo fabricante como GA-01.

CAPÍTULO 7 MATERIAIS E MÉTODOS

Nos capítulos anteriores, foi realizado o estudo da normatização e requisitos para a confecção de um embalado para o transporte de Mo-99. Neste capítulo, será apresentada a metodologia do estudo da viabilidade técnica para fabricação deste embalado, em âmbito nacional.

Para tanto, foi realizado o procedimento esquematizado na FIG.19 e descrito a seguir.

FIGURA 19. Procedimento utilizado no desenvolvimento do trabalho.

Foi feita análise dos projetos de embalados encontrados na plataforma "Embalagem de Materiais Radioativos" (*Radioactive Material Packaging - RAMPAC* ^[24]), bem como a comparação das principais partes deste embalado com outros existentes.

Também foi realizada a seleção dos possíveis materiais que podem ser utilizados para a fabricação de um embalado, com o auxílio do programa CES EduPack e a

metodologia desenvolvida por Ashby ^[8], levando em consideração os requisitos de projeto. O programa ESTAR foi utilizado para verificar a ocorrência de radiação de freamento enquanto o programa XCOM foi utilizado para o cálculo do coeficiente de atenuação da radiação gama de alguns dos materiais selecionados para compor a blindagem do embalado. De posse dos coeficientes de atenuação da radiação gama obtidos e da EQ.1, foram calculadas as espessuras necessárias para que a intensidade da radiação seja reduzida à metade (*Half Value Layer - HVL*) e a um décimo (*Tenth Value Layer - TVL*) de sua intensidade inicial.

7.1 Tabela comparativa – lista RAMPAC

A RAMPAC é uma base de dados do Departamento Americano de Energia (*U.S. Department of Energy - DOE*) onde são encontradas informações a respeito das embalagens para materiais radioativos aprovadas e certificadas por três órgãos: pelo próprio DOE, pelo Departamento Americano de Transportes (*U.S. Department of Transportation - DOT*) e pela Comissão Americana que regulamenta a área nuclear (*U.S. Nuclear Regulatory Commission - NRC*) ^[26].

Em uma lista extensa contendo certificados de aprovação de diversos modelos de embalados foi verificado que, de maneira geral, os embalados do Tipo B são constituídos por partes semelhantes em seus projetos e que a análise dessas partes e dos componentes associados à elas forneceu a base da definição das principais partes de um embalado, ou seja, das partes essenciais que devem constar no projeto para que o fim deste seja atingido – a proteção do conteúdo radioativo, mesmo após passar por condições adversas e hostis de transporte.

Assim, para cada parte considerada essencial foi definida a sua função principal e, após, foram definidos os parâmetros para que fosse realizada a seleção de materiais, conforme procedimento descrito a seguir.

7.2 Seleção de materiais

Metodologia Ashby

A seleção dos possíveis materiais que podem ser utilizados para a fabricação do embalado foi realizada utilizando-se a metodologia desenvolvida por Ashby ^[8], que realiza

a seleção de materiais e processos guiada pelo projeto, isto é, que utiliza como ponto de partida os requisitos funcionais do projeto.

Na FIG.20, se encontra um fluxograma que descreve sucintamente as etapas para o desenvolvimento de um projeto, seguindo a metodologia de Ashby.

FIGURA 20. O fluxograma de projeto. Partindo dos requisitos de projeto são encontradas três etapas para se chegar a especificação do produto: conceito, corporificação e detalhe.

Os requisitos de projeto devem ser estipulados de forma clara e concisa para que sejam delineadas as condições de contorno do “problema” a ser resolvido, ou seja, para que possam ser definidos os parâmetros e as limitações para o desenvolvimento do projeto.

Seguindo o fluxograma de projeto, a primeira etapa é o desenvolvimento de conceitos para executar as funções esperadas pelo produto, cada uma baseada em um princípio de funcionamento. Neste estágio conceitual do projeto, todas as opções devem ser consideradas.

A etapa seguinte é a corporificação, que envolve o dimensionamento dos componentes e a seleção de materiais que atendam aos requisitos de projeto. Nesse estágio, devem ser selecionados e desenvolvidos leiautes viáveis e, ao final, deve ser escolhido um para ser direcionado à etapa seguinte.

O último estágio se refere ao projeto detalhado, em que ocorre a especificação de cada componente do produto.

Este trabalho envolve as duas primeiras etapas do processo de desenvolvimento de um projeto por meio da metodologia sugerida.

CES Edupack

O programa CES Edupack é um pacote de software que implementa o método desenvolvido por Ashby para a seleção de materiais. Este programa consiste em um banco de dados de materiais e informações de processos, sendo que este banco de dados

está disponível em três níveis (introdutório, intermediário e avançado) para atender às diferentes necessidades apresentadas. A versão do programa utilizada neste trabalho foi a do ano de 2013.

O programa consegue fornecer gráficos relacionando parâmetros como densidade, módulo de Young, coeficiente de expansão térmica, dentre outros. Também é possível limitar os valores para cada propriedade desejada (materiais que não atendem os limites estipulados são excluídos). Outra informação que o programa fornece é uma lista que apresenta os valores das propriedades dos materiais, encontrados na seleção. Para cada material constante nessa lista ou no gráfico obtido, são fornecidas fichas com a descrição do material, suas principais áreas de aplicação e todos os valores encontrados para as mais diversas propriedades como: térmicas, mecânicas, ópticas, químicas, dentre outras.

A FIG.21 apresenta a janela do programa, exemplificando as informações que podem ser obtidas.

FIGURA 21. Imagem da janela do software CES EduPack, apresentando o gráfico da densidade. Na extremidade inferior esquerda, nota-se uma lista com os materiais encontrados.

Na FIG.22 se encontra o fluxograma utilizado no processo de seleção de materiais utilizado no presente trabalho.

FIGURA 22. O fluxograma da seleção de materiais.

A metodologia de Ashby, aliada ao programa CES Edupack, guiou a seleção de materiais para cada parte do embalado.

ESTAR

O ESTAR é um programa desenvolvido e disponibilizado pelo Instituto Nacional de Padrões e Tecnologias (*National Institute of Standards and Technology - NIST*), que contém um banco de dados e é capaz de calcular o poder de freamento para elétrons de diversos materiais. Para tanto, o material desejado deve ser selecionado, e as energias de interesse devem ser indicadas no programa (podem ser utilizadas as energias-padrão). Assim, para um dado material, é possível se calcular o poder de freamento por colisão, o poder de freamento por radiação, o poder de freamento total, o rendimento da radiação, entre outras características.

No que concerne ao desenvolvimento desse trabalho, o dado de interesse foi o poder de freamento por radiação, que está relacionado à radiação de freamento (*Bremsstrahlung*) emitida pelo elemento de interesse. A radiação de freamento é aquela que apresenta risco semelhante à radiação γ e que deve ser considerada para fins de projeto, para a confecção da blindagem.

A FIG.23 apresenta a janela inicial do programa, mostrando os campos a serem preenchidos, enquanto a FIG.24 apresenta um exemplo do resultado obtido para o poder de freamento gerado no decaimento do Mo-99.

The ESTAR program calculates stopping power, density effect parameters, range, and radiation yield tables for electrons in various materials. Select a material and enter the desired energies or use the default energies. Energies are specified in MeV, and must be in the range from 0.001 MeV to 10000 MeV.

[Help](#)

[Text version](#)

[Material composition data](#)

Select a common material:
1: Hydrogen

or enter a [unique material](#)

☒ **Graph stopping power:**
☒ Total Stopping Power
☐ Collision Stopping Power
☐ Radiative Stopping Power

☐ **Graph density effect parameter**

☐ **Graph CSDA range**

☐ **Graph radiation yield**

☐ **No graph**

Additional Energies (optional):
 Use energies from a file*
 No file selected.

or

Use energies entered below (one per line)

☒ Include default energies

Note: Only stopping powers and the density effect parameter will be calculated if additional energies are used.

FIGURA 23. Imagem da janela inicial do programa ESTAR.

FIGURA 24. Gráfico obtido para o poder de freamento gerado no decaimento do Mo-99.

XCOM

O XCOM é outro programa desenvolvido e disponibilizado pelo *NIST* que contém um banco de dados dos coeficientes de atenuação γ de diversos materiais. Assim, para um dado material, é possível se calcular as contribuições de cada um dos tipos de interação da radiação γ – efeito fotoelétrico, efeito Compton, produção de pares – e o coeficiente de atenuação total, para um único elemento ou mistura. Como visto na EQ.1, por meio do coeficiente de atenuação γ pode-se calcular a espessura necessária para blindagem.

Na FIG.25 também está presente a janela inicial do programa, mostrando os campos a serem preenchidos. A FIG.26 apresenta um exemplo do resultado obtido para o coeficiente de atenuação γ do chumbo.

Element/Compound/Mixture Selection

In this database, it is possible to obtain photon cross section data for a single element, compound, or mixture (a combination of elements and compounds). Please fill out the following information:

[Help](#)

Identify material by: ☒ Element ☐ Compound ☐ Mixture
Method of entering additional energies: (optional) ☒ Enter additional energies by hand ☐ Additional energies from file (<i>Note: Your browser must be file-upload compatible</i>)

FIGURA 25. Imagem da janela inicial do programa XCOM.

Legenda:

- Atenuação total com espalhamento coerente
- Atenuação total sem espalhamento coerente
- - - Espalhamento coerente
- ... Espalhamento incoerente
- Absorção fotoelétrica
- Produção de pares no campo nuclear
- - - Produção de pares no campo eletrônico

FIGURA 26. Gráfico obtido para o coeficiente de atenuação γ do chumbo.

CAPÍTULO 8 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos capítulos anteriores, foi realizado o estudo da normatização e requisitos para a confecção de um embalado para o transporte de Mo-99. Foi apresentada também a metodologia do estudo da viabilidade técnica para fabricação deste embalado.

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos em cada etapa descrita anteriormente, bem como a discussão pertinente.

8.1 Tabela comparativa – Lista RAMPAC

Em uma lista extensa contendo certificados de aprovação de diversos modelos de embalados foi verificado que, de maneira geral, os embalados do Tipo B são constituídos por quatro partes principais: recipiente interno, blindagem, proteção térmica/impacto e recipiente externo. O motivo de ser utilizado um campo único para apresentar os materiais que fornecem a proteção ao impacto e isolamento térmico se deve ao fato de, em sua maioria, ser utilizado um mesmo material que seja capaz de atender ambos os requisitos na sua aplicação. Para o desenvolvimento deste trabalho as duas propriedades foram analisadas em conjunto também, verificando possíveis materiais que consigam atender ambas. Entretanto, futuramente poderá ser estudada a possibilidade de se separá-las, de forma que, para cada parte funcional sejam utilizados dois materiais distintos.

A vista superior, encontrada para alguns dos modelos, revela que a estrutura é composta por anéis concêntricos, como representada na FIG.27, em que cada anel representa uma das partes do embalado. Dependendo da forma geométrica do embalado e das condições de transporte a que será submetido, também pode ser encontrado um suporte de fixação (*pallet*) acoplado à base do embalado, para evitar seu deslocamento durante o transporte.

FIGURA 27. Esquema ilustrativo apresentando as principais partes constituintes de um embalado do Tipo B.

A TAB.1 apresenta a descrição de alguns dos embalados encontrados na base de dados da RAMPAC. Os embalados contidos na tabela são aqueles classificados como "Embalado Tipo B (U)".

TABELA 1. Comparação dos materiais que compõem as quatro partes principais de um embalado Tipo B(U)^[26].

Número do embalado	Modelo do embalado	Recipiente interno	Blindagem	Proteção térmica/ impacto	Recipiente externo
USA/0124/B(U)-96	F-327/F-245 Nº de série: 1 a 5 (inclusive), 7 e subsequentes.	Aço inoxidável	Urânio empobrecido	Madeira	Aço
USA/0125/B(U)-96	F-327/F-247 Nº de série: 1 a 8 (inclusive), 10, 12 e acima.	Aço inoxidável	Urânio empobrecido	Madeira	Aço
USA/0126/B(U)-96	F-327/F-251 (Nº de série: 1 e acima) F-327/F-251 MKII (Nº de série: 65 e acima) F-327/F-318 (Nº de série: 2-15, 17-27, 30-46, 48, 49, 51-61, 63-82, 84-94)	Aço inoxidável	Urânio empobrecido	Madeira	Aço
USA/0214/B(U)	F-168-X (Nº de série: 22-X, 23-X, 24-X, 25-X, 26-X, 41-X)	Aço	Chumbo	Aço	Aço
USA/0348/B(U)	NORDION INC. F-231 (Nº de série: 7, 8 e 9)	Aço	Chumbo	*	Aço
USA/0382/B(U)-96	CROFT ASSOCIATES 2835A	Aço inoxidável e alumínio	Urânio empobrecido e/ou tungstênio	Espuma fenólica e cortiça	Aço inoxidável

* Não informado.

TABELA 1. Comparação dos materiais que compõem as quatro partes principais de um embalado Tipo B(U)^[26]. (continuação).

Número do embalado	Modelo do embalado	Recipiente interno	Blindagem	Proteção térmica/ impacto	Recipiente externo
USA/0444/B(U)-96	NORDION INC. F-271 (Nº de série: 1 e acima)	Aço inoxidável	Chumbo	*	Aço baixo carbono
USA/0562/B(U)-96	ZA/NNR1005/B(U)-96 (BEATRICE)	Aço inoxidável	Urânio empobrecido	Cortiça	Aço inoxidável
USA/0578/B(U)-96	MDS NORDION F-231 e F-231-MK2 Nº de série: 11 e acima	*	Chumbo e tungstênio	*	*
USA/0587/B(U)-85	GAMMACELL 40 MK3 IRRADIATOR, Revestimento 20WC-5 (Nº de série: 1A, 1B, 2A, 2B, 3A, 3B)	*	Chumbo	*	*
USA/0617/B(U)-96	MDS NORDION F-168 (1996) e F-168-X (1996) (Nº de série: 53 e acima)	Aço	Chumbo	Cerâmica	Aço
USA/0665/B(U)-96	F-431/GC-1000, F-431/GC-3000 e F-431/GAMMATOR M38	Aço baixo carbono	Chumbo	Espuma de poliuretano	Aço inoxidável
USA/0674/B(U)-96	F-430/GC-40, F-430/GC-1000 e GC-3000, F-430/CIS MODEL IBL 437C, F-430/CIS MODEL IBL 637, F-430/MOLSGAARD MODEL GC-2000, F-430/GAMMATOR M38	Aço inoxidável	Chumbo	Espuma de poliuretano	Aço inoxidável
USA/0697/B(U)-96	MDS NORDION F-458/F-245, F-458/F-247, F-458/F-251, F-458/F-251 MK2, F-458/F-318 e F-458/F-448	Aço inoxidável	Urânio empobrecido ou chumbo	Espuma de poliuretano	Aço inoxidável
USA/0714/B(U)-96	BEST THERATRONICS F-423 (contendo irradiador GAMMACELL 220)	Aço inoxidável	Chumbo (pode conter urânio e/ou tungstênio)	Espuma de poliuretano	Aço inoxidável
USA/6162/B(U)	F-127 J-ROD Nº de série: 50, 52, e 54	*	Chumbo	*	Aço
USA/6217/B(U)	F-143 (cápsula para transferência) (Nº de série: 20, 50, 53, 54, 59, 62 e 64) F-158 (cápsula para transferência) (Nº de série: 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10 e 14)	Aço	Chumbo	Compensado de madeira e material refratário (não especificado)	Aço
USA/6613/B(U)-96	Modelo 702	*	Urânio empobrecido	*	Aço inoxidável
USA/9027/B(U)-96	741-OP	Aço carbono	Urânio empobrecido	Espuma de poliuretano e madeira	*
USA/9035/B(U)-96	680-OP	Aço carbono	Urânio empobrecido	Espuma de poliuretano e madeira	*

* Não informado.

TABELA 1. Comparação dos materiais que compõem as quatro partes principais de um embalado Tipo B(U)^[26]. (continuação).

Número do embalado	Modelo do embalado	Recipiente interno	Blindagem	Proteção térmica / impacto	Recipiente Externo
USA/9036/B(U)-96	C-1	Aço	Urânio empobrecido	Espuma (não especificado)	Aço carbono
USA/9056/B(U)-85	Source Production and Equip Co Inc. Model SPEC 2-T	Aço	Urânio empobrecido	*	*
USA/9148/B(U)-96	770	*	Urânio empobrecido	Espuma de poliuretano	Aço
USA/9157/B(U)-96	IR-100	*	Urânio empobrecido	Espuma de poliuretano	Aço inoxidável
USA/9168/B(U)-96	CNS 8-120B	Aço carbono	Chumbo	*	Aço carbono
USA/9185/B(U)-96	OP-100	*	Urânio empobrecido	Espuma de poliuretano	Aço inoxidável
USA/9204/B(U)F-96	CNS 10-160B	Aço carbono	Chumbo	Aço inoxidável	Aço carbono
USA/9215/B(U)	NPI-20WC-6 MKII	Aço	Chumbo	Madeira	Aço
USA/9233/B(U)-96	TN-RAM	Aço inoxidável	Chumbo	Aço inoxidável e madeira	Aço inoxidável
USA/9233/B(U)-96	TN-RAM	Aço inoxidável	Chumbo	Aço inoxidável e madeira	Aço inoxidável
USA/9263/B(U)-96	SPEC-150	Ti, liga de Ti ou liga de Zr	Urânio empobrecido	*	Titânio
USA/9269/B(U)-96	Modelo 650L SOURCE CHANGER	Aço inoxidável	Urânio empobrecido	*	Aço carbono
USA/9282/B(U)-96	SPEC-300	*	Urânio empobrecido	Espuma de poliuretano	Aço inoxidável
USA/9296/B(U)-96	QSA Global, Inc., Model No. 880 Series Package	*	Urânio empobrecido	*	Aço inoxidável
USA/9299/B(U)-85	Modelo F-423	Aço inoxidável	Chumbo	Espuma de poliuretano	Aço inoxidável
USA/9310/B(U)-96	MDS Nordion Inc. Modelo F-431/GC-1000 ou GC-3000	*	Chumbo	Espuma (não especificada)	Aço inoxidável
USA/9314/B(U)-96	Família do modelo 976	*	U, U empob. ou W	Cortiça e espuma de PU	Aço inoxidável
USA/9316/B(U)-96	AOS: 025A, 050A, 100A, 100B e 100A-S	Aço inoxidável	Liga de W ou aço carbono	Espuma de poliuretano	Aço inoxidável
USA/9320/B(U)-96	MIDUS	Aço inoxidável	Urânio empobrecido	Espuma de poliuretano	Aço inoxidável
USA/9337/B(U)-96	CROFT 3979A	Quartzo ou alumínio	Chumbo e tungstênio	Cortiça	Aço inoxidável
USA/9338/B(U)-96	SAFKEG-HS 3977A	Quartzo ou alumínio	Urânio ou tungstênio	Cortiça	Aço inoxidável
USA/9357/B(U)-96	SENTRY Modelo: 110, 330 e 867	*	Urânio empobrecido	Espuma de poliuretano	Aço inoxidável
USA/9371/B(U)-96	Família do modelo 360	*	W ou W e U empobrecido	*	*

* Não informado.

O embalado descrito anteriormente, GANUK – Modelo GA-01, não se encontra na lista da *RAMPAC*, uma vez que seu certificado de aprovação para utilização no transporte de substâncias radioativas não foi revalidado.

Da análise dos embalados do Tipo B existentes na lista *RAMPAC*, definiram-se as principais partes de um embalado, conforme descrito anteriormente. Posteriormente, foi realizado o processo de seleção de materiais para cada uma das partes constituintes, que será apresentado a seguir, levando-se em consideração as informações dos materiais encontrados na tabela.

8.2 Seleção de materiais

O método utilizado para a seleção de materiais foi único, independente da parte abordada. Entretanto, para cada parte foi definida sua função e, conseqüentemente, os requisitos de projeto – requisitos essenciais, requisitos desejáveis e a viabilidade de fabricação – diferem entre si, de forma que, durante o procedimento da seleção, os parâmetros, as propriedades, os gráficos e as listas obtidas não são idênticos, e sim, análogos.

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos para cada uma das partes principais definidas anteriormente: blindagem, proteção térmica/impacto, recipiente externo e recipiente interno, nesta ordem. A parte referente à blindagem será apresentada primeiro, uma vez que, do ponto de vista da finalidade essencial de um embalado, a contenção da radiação é de extrema importância. À blindagem estão atrelados os procedimentos realizados nos programas ESTAR e XCOM, bem como a comparação final das espessuras (HVL e TVL) dos materiais selecionados.

8.2.1 Blindagem

Este trabalho buscou possíveis materiais que poderão ser utilizados na fabricação de um embalado para o transporte de Mo-99. Dessa forma, inicialmente teve de ser realizada a verificação da radiação de freamento emitida pelo elemento em questão (Mo-99) pois, caso esta fosse significativa, também deveria ser levada em consideração no cálculo das espessuras, junto à radiação γ . Como apresentado no item anterior, esse procedimento foi realizado com o programa ESTAR, levando-se em consideração os fótons emitidos de intensidade relativa (I_R) mais significativos ^[27]: 140,511 keV ($I_R =$

37,3%); 181,063 keV ($I_R = 50,1\%$); 739,500 keV ($I_R = 100\%$) e 777,921 keV ($I_R = 35,3\%$). Para garantir a segurança da blindagem, também foi utilizado o fóton de maior energia, embora este apresente intensidade relativa pouco significativa: 1082,000 keV ($I_R = 0,005\%$). Os resultados obtidos são apresentados na TAB.2, a seguir.

TABELA 2. Valores médios obtidos das energias da radiação de freamento emitidas no decaimento do Mo-99. Os valores da tabela são valores arredondados.

Energia do fóton emitido (keV)	Energia média da radiação de freamento (keV)
140	26
181	28
739	52
778	54
1082	70

Dos dados obtidos da TAB.2, pode-se verificar que a energia da radiação de freamento produzida na emissão dos fótons provenientes do decaimento do Mo-99 apresenta ordem de grandeza dez vezes menor, para a maioria dos fótons emitidos apresentados na tabela. Isso significa que a radiação de freamento não precisará ser levada em consideração no cálculo da espessura da blindagem, uma vez que a espessura necessária para atenuar os fótons emitidos (radiação γ) será maior do que aquela necessária para atenuar a radiação de freamento.

Realizada a verificação da radiação de freamento emitida pelo Mo-99, pôde-se continuar o processo da seleção de materiais, com o auxílio do programa CES Edupack. O procedimento realizado e os resultados obtidos estão descritos a seguir.

Considerando-se os requisitos de projeto para uma blindagem, partiu-se dos requisitos essenciais, os requisitos desejáveis e a viabilidade de fabricação, como representado na FIG.28.

FIGURA 28. O fluxograma apresenta os requisitos considerados para a seleção de materiais para a blindagem.

A atenuação da radiação γ geralmente é mais efetiva com materiais de alta densidade; isso porque a probabilidade da radiação sofrer atenuação depende da interação desta com a matéria, assim, quanto maior o número de núcleos ou elétrons possíveis de interagirem com o fóton, mais energia ele perde ao longo da sua trajetória. A TAB.1, apresenta diversos materiais que são utilizados para blindagem de radiação γ ; dentre eles, encontram-se o chumbo e tungstênio, por exemplo. Iniciando-se a análise, partiu-se do material de menor densidade que apresenta aplicação na área nuclear como blindagem para embalados do Tipo B: o chumbo. Então, a densidade do chumbo configurou como o limite inferior do parâmetro colocado no programa.

Inicialmente, temos o gráfico da FIG. 29, onde consta o universo total de materiais encontrados na base de dados do programa, organizados pelo valor da densidade.

FIGURA 29. O gráfico apresenta todos os materiais encontrados na base de dados do programa CES Edupack, organizados pelo valor da densidade.

Nas informações fornecidas pelo software, o valor da densidade do chumbo se encontra na faixa de $1,13 \times 10^4$ - $1,14 \times 10^4$ kg/m³. Estabelecendo-se o valor mínimo de $1,13 \times 10^4$ kg/m³ como o limite inferior da seleção, foi obtido o gráfico da FIG.30.

FIGURA 30. Gráfico dos resultados obtidos quando fixado o limite inferior de densidade. O espectro contínuo em cinza se refere aos materiais que foram excluídos da seleção.

A FIG. 31 é a ampliação da área contida no círculo em vermelho da FIG.30, presente na extremidade superior esquerdo do gráfico. Foram indicados alguns dos materiais presentes.

FIGURA 31. Aumento da área circular da FIG.30, apresentando alguns dos materiais que figuram como candidatos à utilização na blindagem do embalado.

Da Norma da CNEN, tem-se que a integridade da contenção dos embalados não deve ser reduzida quando submetida a temperaturas ambientes variando de - 40 °C a 70 °C. Este requisito exige que o material a ser utilizado deva apresentar baixo valor do coeficiente de expansão térmica, para que não haja expansão ou retração do material que comprometa a estrutura do embalado.

Novamente utilizando os dados da TAB.1, dentre os materiais utilizados para a blindagem, o chumbo é o material que apresenta maior coeficiente de expansão térmica (dentre os que já constam na seleção), sendo fixado seu valor médio em 29,2 μ deformações/°C. O gráfico da FIG.32 apresenta a seleção obtida e a FIG.33 representa o aumento da área selecionada pelo círculo.

FIGURA 32. Gráfico dos resultados obtidos quando fixados os limites de densidade e do coeficiente de expansão térmica.

O procedimento de seleção de materiais continua escolhendo-se de forma progressiva os parâmetros a serem utilizados na análise. A cada parâmetro, esperou-se refinar os resultados obtidos, até que se fosse atingido um grupo seletivo de materiais que desempenhassem a função desejada.

Os resultados iniciais obtidos pela seleção foram apresentados anteriormente. Por fim, foi gerado o gráfico da densidade em relação ao preço (valor em reais por quilograma de material), apresentado na FIG.34.

FIGURA 33. Aumento da área circular da FIG.32, apresentando alguns dos materiais que figuram como candidatos à utilização na blindagem do embalado, após o segundo refinamento.

FIGURA 34. Valores de densidade em relação ao preço de mercado (valores constantes no banco de dados), apresentando alguns dos materiais que figuram como candidatos à utilização na blindagem do embalado.

Analisando-se a lista obtida pelo programa, verificou-se a presença de diversos materiais considerados metais preciosos (como ouro e platina). Esse grupo apresenta os maiores valores para os preços por quilograma de material, sendo o ródio 10^5 vezes mais caro do que o chumbo, por exemplo. Fixando-se o valor máximo limitado pelo preço do

urânio empobrecido entre 307-327 BRL/kg, os materiais que ainda figuram são: ligas de chumbo (Pb), liga de molibdênio (Mo), ligas de tungstênio (W), háfnio (Hf) e urânio (U) empobrecido.

Analisando-se a viabilidade de fabricação, a fabricação de uma blindagem em U empobrecido não é viável, uma vez que a manipulação deste material só poderia ser realizada nos institutos ligados à CNEN, o que exigiria que fosse desenvolvida uma infraestrutura para a fabricação do embalado e pessoal especializado.

Quanto às ligas de Mo, as reservas desse elemento no Brasil são restritas e não existem minas para sua extração; dessa forma, todas as ligas consumidas no país são importadas. Em 2013, as importações totais atingiram 9.920 toneladas, com dispêndio de U\$ 124,9 milhões. Os principais fornecedores foram: Chile, Países Baixos, Estados Unidos, China, Áustria e Alemanha ^[28]. Uma vez que este trabalho visou a fabricação de um embalado com recursos nacionais, a escassa (nula) disponibilidade de matéria-prima dentro do país inviabiliza sua utilização como possível material para tal finalidade.

O Hf é um metal de transição encontrado comumente associado à minerais de zircônio. Na crosta terrestre, o zircônio ocorre normalmente associado ao Hf em uma proporção de 50 para 1 ^[29]. O Brasil, apesar de apresentar produção de zircônio, é dependente de fontes de suprimento estrangeiras ^[30]. Assim, com o mesmo argumento apresentado para as ligas de Mo, o Hf também não será considerado como possível candidato para a fabricação da blindagem do embalado.

O Pb é encontrado e produzido no Brasil; entretanto, toda a produção do concentrado de Pb é exportada, uma vez que o país não conta com produção primária de Pb metálico refinado ^[31]. Assim, a utilização de Pb e suas ligas seria interessante não apenas do ponto de vista de possibilitar a fabricação do embalado, mas também do ponto de vista econômico, pois poderia motivar o desenvolvimento da produção de Pb metálico refinado no país.

Por fim, o W é encontrado em diversas jazidas brasileiras, nas regiões Nordeste (RN, PB), Norte (PA, RN), Sudeste (SP) e Sul (SC) do país. Devido à mineração e produção significativas, as exportações brasileiras de minério de W e seus concentrados sofreram elevação de mais de 130% em 2013 (comparando-se com o ano anterior) ^[32]. Portanto, as ligas de W também configuram como possíveis candidatas à fabricação da blindagem do embalado, apresentando vantagem em relação ao Pb, que não é produzido em sua forma

metálica e refinada no Brasil.

Portanto, para a próxima etapa foram consideradas apenas Pb e suas ligas e W e suas ligas. Para os materiais selecionados para a blindagem, foram obtidos os valores dos coeficientes de atenuação total com o auxílio do programa XCOM, levando-se em consideração os fótons emitidos de intensidade relativa (I_R) mais significativos ^[27]: 140,511 keV ($I_R = 37,3\%$); 181,063 keV ($I_R = 50,1\%$); 739,500 keV ($I_R = 100\%$) e 777,921 keV ($I_R = 35,3\%$). Posteriormente, foram calculadas as espessuras necessárias para que a intensidade da radiação seja reduzida à metade (HVL) e a um décimo (TVL) de sua intensidade inicial. Os resultados obtidos estão apresentados na TAB.3.

TABELA 3. Valores obtidos de HVL e TVL utilizando-se os coeficientes fornecidos pelo programa XCOM, considerando-se a maior espessura encontrada para cada material.

Material	Densidade (g/cm ³)	Energia do fóton (keV)	μ (cm ² /g)	HVL (cm)	TVL (cm)
Chumbo	11,3	777,921	0,0865	0,71	2,35
Liga Pb-Sb	11,2	140,511	0,1132	0,63	2,09
Tungstênio	19,3	777,921	0,0788	0,45	1,51
Liga W-Ni-Cu	17,9	777,921	0,07826	0,49	1,64
Liga W-Ni-Fe	18,4	777,921	0,07849	0,48	1,59

Os dados da TAB.3 mostram que, embora o chumbo seja um material interessante do ponto de vista de suas propriedades e, principalmente, preço, seria necessária uma espessura relativamente maior para reduzir a mesma intensidade de radiação, quando comparado ao W e suas ligas. Também há a dificuldade do Pb não ser produzido em sua forma metálica e refinada no Brasil, como dito anteriormente.

Do processo de seleção, restaram apenas o W e suas ligas. Comparando-se o W puro e duas de suas ligas (W-Ni-Cu e W-Ni-Fe), nota-se que a variação da espessura necessária para a atenuação da radiação γ não é significativa, quando solicitadas à mesma capacidade de blindagem. Dessa forma, do ponto de vista da blindagem, qualquer uma delas serviria à finalidade aqui proposta. Inclusive, a liga W-Ni-Fe já é utilizada para blindagem de radiação X e γ por não apresentarem propriedades magnéticas, sendo encontradas comercialmente ^[33,34].

8.2.2 Proteção térmica/impacto

Considerando-se os requisitos de projeto para a parte referente à proteção térmica/impacto, seguiu-se o fluxograma da FIG.35.

FIGURA 35. O fluxograma apresenta os requisitos considerados para a seleção de materiais para a proteção térmica/impacto.

A primeira propriedade a ser avaliada é a condutividade térmica, que deve ser bem baixa, uma vez que o material deve ser isolante térmico. Inicialmente, tem-se o gráfico da FIG. 36, onde consta o universo total de materiais encontrados na base de dados do programa, organizados pelo valor da condutividade térmica.

FIGURA 36. O gráfico apresenta todos os materiais encontrados na base de dados do programa CES Edupack, organizados pelo valor da condutividade térmica.

Foi utilizado o material que apresenta maior valor de condutividade térmica da

lista RAMPAC, para este caso, o aço. Devido ao fato de, em muitas das descrições encontradas não ser especificado o tipo do aço e, para fins de alargar o espectro dos possíveis materiais que atendam tal função, foi utilizado o intervalo de valores da condutividade térmica dos aços de baixa liga. Verificando no banco de dados do programa CES Edupack, temos que a condutividade térmica desses aços está na faixa de 34-55 W/m.°C. Fixando-se o valor de 55 W/m.°C como o maior valor aceito (limite superior), foi obtido o gráfico da FIG. 37.

FIGURA 37. Gráfico dos resultados obtidos quando fixado o limite superior de condutividade térmica. O espectro contínuo em cinza se refere aos materiais que foram excluídos da seleção. Na figura, estão destacados alguns dos materiais que constam nos embalados descritos na lista RAMPAC.

Nota-se que, para uma mesma família de materiais (aços, madeira, espumas – como destacados na FIG. 37), a seleção abrange uma faixa de valores com extremos bem distantes; entretanto, de modo geral, pode-se considerar que materiais como madeira, cortiça e as espumas se destacam como aqueles que apresentam baixos valores de condutividade térmica.

Prosseguindo, foi considerada a propriedade de resiliência do material, uma vez que a proteção ao impacto deve suportar os ensaios descritos na Norma da CNEN, a exemplo do ensaio de queda livre. A resiliência é a capacidade de uma material absorver

energia quando ele é deformado elasticamente e, depois, com a remoção da carga, permitir a recuperação dessa energia ^[35]. Uma vez que o programa não fornece tal parâmetro, foram utilizados o módulo de Young e o limite de escoamento, pois estes se relacionam com o módulo de resiliência ^[35], de forma que os materiais considerados resilientes possuem módulos de elasticidade baixos e limites de escoamento elevados.

O gráfico obtido que relaciona a condutividade térmica com o módulo de Young, para os materiais selecionados anteriormente está mostrado na FIG.38.

FIGURA 38. Gráfico que relaciona a condutividade térmica e o módulo de Young, dos resultados obtidos quando fixado o limite superior de condutividade térmica.

Dada a extensão do universo dos possíveis materiais, para um segundo refinamento dos dados, optou-se por limitar o módulo de Young considerando a madeira que apresenta o maior valor de condutividade térmica: a madeira de Lignumvitae (*Guaiaecum spp.*). Verificando suas propriedades no banco de dados do CES Edupack, tem-se que os valores estimados da condutividade térmica para essa madeira se encontram na faixa de 0,54-0,66 W/m.°C., e os valores estimados para o módulo de Young na faixa de 12,1-14,8 GPa. Neste ponto, é importante frisar que a maioria dos materiais naturais não apresenta propriedades isotrópicas e que os valores encontrados variam dentre amostras

de mesma espécie. Fixando-se o limite superior da condutividade térmica em 0,66 W/m.°C e o limite superior do módulo de Young em 12,1 GPa, tem-se o gráfico da FIG. 39

FIGURA 39. Gráfico que relaciona a condutividade térmica e o módulo de Young, dos resultados obtidos quando fixado os limites superiores da condutividade térmica e do módulo de Young.

Continuando o procedimento de seleção, a próxima propriedade explorada foi o limite de escoamento; para a função desejada o material deve apresentar um elevado limite de escoamento, como dito anteriormente. Da lista dos materiais utilizados para a função de proteção térmica/impacto que figuram na lista *RAMPAC*, aquele que apresenta os menores valores do parâmetro desejado é a espuma de poliuretano (PU). Verificando suas propriedades no banco de dados, têm-se que os valores estimados do limite de escoamento para os diversos tipos de espumas de PU se encontram na faixa de 0,0012-9,44 MPa. Fixando-se o limite inferior do limite de escoamento para a seleção em 9,44 MPa, o gráfico obtido que relaciona a condutividade térmica com o limite de escoamento para os materiais selecionados anteriormente está mostrado na FIG.40.

FIGURA 40. Gráfico que relaciona a condutividade térmica e o módulo de Young, dos resultados obtidos quando fixado os limites superior da condutividade térmica, superior do módulo de Young e inferior do limite de escoamento.

Após o terceiro refinamento, materiais como a espuma fenólica e a cortiça foram excluídos. É interessante ressaltar que, na análise dos materiais presentes no gráfico, a fibra de sisal (*Agave sisalana*) apresentou um dos maiores valores para o limite de escoamento, aliado a um baixo valor de condutividade térmica. A partir desse ponto, são considerados os requisitos desejáveis para a função de proteção térmica/impacto: densidade e coeficiente de expansão térmica.

Uma vez blindada a radiação, é interessante que o material utilizado para realizar a função requerida apresente uma baixa densidade, para não aumentar o peso final do embalado. De acordo com os materiais comumente encontrados na lista RAMPAC, e considerados aqueles já excluídos anteriormente, o material de maior densidade encontra-se na família das madeiras. Como não se sabe especificamente qual o tipo de madeira, partiu-se do valor encontrado para a madeira de maior densidade encontrada na lista dos possíveis materiais: madeira de ébano (*Diospyros spp.*). No banco de dados do programa, encontram-se os valores de densidade desta madeira na faixa de 940-1140 kg/m³. Então fixou-se o limite da densidade para o valor máximo de 1140 kg/m³. O gráfico obtido se encontra na FIG.41.

FIGURA 41. Gráfico que relaciona a condutividade térmica e a densidade, dos resultados obtidos quando fixado os limites superior da condutividade térmica, superior do módulo de Young, inferior do limite de escoamento e superior da densidade.

Da Norma CNEN-NE-5.01, tem-se que a integridade da contenção dos embalados não deve ser reduzida quando submetida a temperaturas ambientes variando de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este requisito exige que o material a ser utilizado deva apresentar baixo valor do coeficiente de expansão térmica, para que não haja expansão ou retração do material que comprometa a estrutura do embalado. Neste ponto é interessante lembrar que, para o caso da blindagem analisada anteriormente, o chumbo é o material que apresenta maior coeficiente de expansão térmica, sendo fixado seu valor médio em $29,2\text{ }\mu\text{defomações}/^{\circ}\text{C}$. Para que haja coerência entre o comportamento de expansão térmica do material da blindagem com relação ao material a ser utilizado para a proteção térmica/impacto, será utilizado o coeficiente de expansão térmica do chumbo. O gráfico da FIG.42 apresenta o gráfico obtido relacionando-se o coeficiente de expansão térmica e a densidade.

FIGURA 42. Gráfico que relaciona o coeficiente de expansão térmica e a densidade, dos resultados obtidos quando fixado os limites superior da condutividade térmica, superior do módulo de Young, inferior do limite de escoamento, superior da densidade e superior do coeficiente de expansão térmica.

Da análise dos resultados obtidos é interessante observar que a maioria faz parte da família dos materiais naturais, como as madeiras e os compensados. A única ressalva é a espuma de policloreto de vinila (PVC) que, mesmo após os refinamentos descritos, ainda é encontrada na seleção.

Por fim, foi gerado o gráfico da densidade em relação ao preço (valor em reais por quilograma de material), apresentado na FIG.43.

FIGURA 43. Valores de densidade em relação ao preço de mercado (valores constantes no banco de dados), apresentando alguns dos materiais que figuram como candidatos à utilização para a proteção térmica/impacto do embalado.

Da lista obtida no programa, tem-se um grupo de materiais que apresenta valores na faixa de 0,237-6,54 BRL/kg e outro apresentando valores na faixa de 11,8-43 BRL/kg. Do último material de um grupo ao primeiro material do segundo grupo, o valor praticamente dobra. Levando-se este ponto em consideração, o preço máximo foi fixado em 6,54 BRL/kg; os resultados obtidos se encontram na FIG.44.

O último requisito a ser discutido é a disponibilidade de matéria-prima no país. Dos resultados obtidos, foi verificada a disponibilidade de encontrar a espécie no Brasil; a TAB.4 apresenta as madeiras e as regiões em que são encontradas. Dos dados da tabela, as madeiras que podem ser encontradas no Brasil são: *Cariniana spp.*, *Juglans spp.*, *Ceiba pentandra*, *Hura crepitans*, *Terminalia amazonia*, *Cocos nucifera*, *Araucaria augustifolia*, *Aspidosperma spp.*, *Pinus spp.*, *Sequoia sempervirens*, *Cedrela spp.* e *Cedrelinga catenaeformis*. Além das madeiras, estão inclusos nos possíveis materiais os aglomerados e compensados de madeira de diversos tipos, sendo estes os mais indicados para aplicação desejada, pelo baixo custo e facilidade de conformação.

TABELA 4. Madeiras encontradas na seleção de materiais para a função de proteção térmica/impacto. Estão presentes as regiões em que podem ser encontradas ^[36].

Designação	Região de distribuição geográfica
<i>Alnus spp.</i>	Europa, norte da África, Oriente Médio, Ásia, América do Norte
<i>Cariniana spp.</i>	América do Sul (tropical a temperada)
<i>Fraxinus spp.</i>	Europa, norte da África, Oriente Médio, Ásia, América do Norte
<i>Populus spp.</i>	Europa, África do Norte, Oriente Médio, Ásia temperada, Índia, Paquistão, Sri Lanka, América do Norte
<i>Turraeanthus africanus</i>	África tropical
<i>Tilia spp.</i>	Europa, África do Norte, Oriente Médio, Ásia temperada, América do Norte
<i>Fagus sylvatica</i>	Europa, África do Norte, Oriente Médio, Ásia temperada, América do Norte
<i>Betula spp.</i>	Europa, América do Norte, Ásia temperada, Índia, Paquistão, Sri Lanka
<i>Juglans spp.</i>	México, América Central, América do Sul tropical
<i>Chamaecyparis spp.</i>	América do Norte, Ásia
<i>Ceiba Pentandra</i>	Índia, Paquistão, Sri Lanka, Burma (Myanmar), Tailândia, Laos, Vietnã, Camboja, Indonésia, Ilhas do Pacífico, Austrália, África tropical, México, América Central, Caribe, América do Sul tropical
<i>Castanea spp.</i>	Europa, África do Norte, Oriente Médio, Ásia temperada, América do Norte
<i>Ulmus spp.</i>	Europa, África do Norte, Oriente Médio, Ásia temperada, América do Norte
<i>Abies spp.</i>	Europa, África do Norte, Oriente Médio, Ásia temperada, América do Norte
<i>Celtis spp.</i>	América do Norte, México, América Central
<i>Tsuga canadensis</i>	Canadá
<i>Carya spp.</i>	América do Norte
<i>Hura crepitans</i>	América Central, México, América do Sul tropical
<i>Pycnanthus angolense</i>	África tropical
<i>Dyera costulata</i>	Tailândia, Laos, Vietnã, Camboja a Indonésia
<i>Terminalia amazonia</i>	América Central, México, América do Sul tropical
<i>Terminalia superba</i>	África tropical

TABELA 4. Madeiras encontradas na seleção de materiais para a função de proteção térmica/impacto. Estão presentes as regiões em que podem ser encontradas ^[36]. (continuação).

Designação	Região de distribuição geográfica
<i>Khaya spp.</i>	África tropical
<i>Acer spp.</i>	Europa, África do Norte, Oriente Médio, Ásia temperada, América do Norte
<i>Terminalia superba</i>	África tropical
<i>Khaya spp.</i>	África tropical
<i>Acer spp.</i>	Europa, África do Norte, Oriente Médio, Ásia temperada, América do Norte
<i>Quercus spp.</i>	Europa, África do Norte, Oriente Médio, Ásia temperada, América do Norte, Índia, Paquistão, Sri Lanka
<i>Triplochiton scleroxylon</i>	África tropical
<i>Cocos nucífera</i>	Ásia, América Central, América do Sul, África
<i>Araucaria augustifolia</i>	América do Sul, África do Sul, Portugal, Austrália
<i>Aspidosperma spp.</i>	América do Sul tropical e temperada
<i>Pinus spp.</i>	América do Norte, América do Sul
<i>Sequoia sempervirens</i>	América do Norte, América do Sul
<i>Tabebuia spp.</i>	América Central e América do Sul
<i>Sassafras albidum</i>	América do Norte
<i>Shorea spp.</i>	Tailândia, Laos, Vietnã, Camboja, Indonésia, Índia
<i>Cedrela spp.</i>	México, América Central, América do Sul tropical
<i>Picea spp.</i>	América do Norte, Ásia
<i>Liquidambar styraciflua</i>	América do Norte
<i>Platanus spp.</i>	América do Norte, Europa
<i>Taxus bravifolia</i>	América do Norte
<i>Cedrelinga catrenaeformis</i>	América do Sul tropical
<i>Nyssa spp.</i>	América do Norte
<i>Salix alba</i>	Europa, América do Norte, norte da África, Ásia
<i>Liriodendron tulipifera</i>	América do Norte

8.2.3 Recipiente externo

Considerando-se os requisitos de projeto para a parte referente ao recipiente externo, seguiu-se o fluxograma da FIG.44.

FIGURA 44. O fluxograma apresenta os requisitos considerados para a seleção de materiais para recipiente externo.

A primeira propriedade avaliada para o revestimento externo foi a temperatura máxima de trabalho. Dentre os ensaios descritos na Norma da CNEN, o ensaio térmico consiste em envolver completamente a amostra a ser ensaiada em um fogo resultante da combustão de um combustível hidrocarbonado com ar, sendo que a temperatura média da chama deve ser de 800 °C. Assim, estipulando-se o limite inferior da temperatura máxima de trabalho em 800 °C, obtém-se o gráfico da FIG. 45.

FIGURA 45. Gráfico dos resultados obtidos quando fixado o limite inferior de temperatura máxima de trabalho. O espectro contínuo em cinza se refere aos materiais que foram excluídos da seleção.

A FIG.46 é a ampliação da área contida no círculo em vermelho da FIG.45, presente na extremidade superior esquerda do gráfico. Foram indicados alguns dos materiais presentes.

FIGURA 46. Aumento da área circular da FIG.45, apresentando alguns dos materiais que figuram como candidatos à utilização para o recipiente externo do embalado, após fixado o limite inferior da temperatura máxima de trabalho.

Da análise do gráfico da FIG.46 nota-se a predominância dos materiais refratários (linhas amarelas) e das ligas metálicas (linhas em vermelho); não há materiais poliméricos.

O segundo refinamento levou em consideração a tensão de ruptura e o módulo de Young. Por se tratar de um recipiente externo, este deverá apresentar alta tensão de ruptura e alto módulo de Young, uma vez que a parte externa dará o suporte e proteção final do embalado – para fins de transporte, empilhamento, manuseio, entre outros. A FIG.47 apresenta o gráfico obtido relacionando-se as duas propriedades.

FIGURA 47. Gráfico que relaciona a tensão de ruptura com o módulo de Young, dos resultados obtidos quando fixado o limite inferior de temperatura máxima de trabalho.

Da lista *RAMPAC*, tem-se que o material mais utilizado para tal finalidade é o aço. Devido ao fato de, em muitas das descrições encontradas não ser especificado o tipo do aço e, para fins de alargar o espectro dos possíveis materiais que atendam tal função, foram utilizados os menores valores encontrados para cada parâmetro: para a tensão de ruptura utilizou-se o aço baixo carbono, cujos valores se encontram no intervalo de 345-580 MPa, e para o módulo de Young utilizou-se o aço inoxidável, cujos valores se encontram no intervalo de 189-210 GPa. Então, fixando-se os valores de 345 MPa para a tensão de ruptura e de 189 GPa para o módulo de Young, como os menores valores aceitos (limites inferiores), foi obtido o gráfico da FIG.48.

FIGURA 48. Gráfico que relaciona a tensão de ruptura com o módulo de Young, dos resultados obtidos quando fixados o limites inferiores de temperatura máxima de trabalho, tensão de ruptura e módulo de Young.

A FIG. 49 é a ampliação da área contida no círculo em vermelho da FIG.48, presente na extremidade superior direita do gráfico. Foram indicados alguns dos materiais presentes.

FIGURA 49. Aumento da área circular da FIG.48, apresentando alguns dos materiais que figuram como candidatos à utilização para o recipiente externo do embalado, após fixado os limites inferiores de temperatura máxima de trabalho, tensão de ruptura e módulo de Young.

Dentre os ensaios descritos na Norma CNEN-NE-5.01, se encontram os ensaios de queda livre. Considerando que, de forma geral, os materiais cerâmicos apresentam fratura frágil, seu uso é limitado para aplicações que exijam grande impacto. Dessa forma, o próximo refinamento excluiu o grupo dos materiais cerâmicos da seleção, resultando no gráfico da FIG.50. Nessa figura, utilizou-se a mesma região de aumento da FIG.49.

FIGURA 50. Mesmo gráfico da FIG.49, após excluído o grupo dos materiais cerâmicos.

Do gráfico da FIG.50, tem-se a presença dos aços, representados pelos círculos em verde-petróleo; das ligas de níquel (Ni) e cobalto (Co), em vermelho; de alguns compósitos (como o indicado na figura), em marrom; e variações do elemento berílio (Be), em roxo.

Assim como discutido para a parte referente à proteção térmica/impacto, é interessante que o material utilizado para o recipiente externo apresente uma baixa densidade, para não aumentar o peso final do embalado. Novamente, para esse refinamento, foi utilizado o aço e, para fins de alargar o espectro dos possíveis materiais que atendam tal função, foi utilizado o aço que apresenta a maior faixa de valores: o aço inoxidável. Os valores encontrados para este aço se apresentam no intervalo de 7600-8100 kg/m³. Então fixou-se o limite da densidade para o valor máximo de 8100 kg/m³.

Para fins de comparação e melhor análise, o gráfico da FIG.48 apresenta a densidade em relação ao preço do material. Quanto ao requisito referente ao coeficiente de expansão térmica, este não alterou a lista dos possíveis materiais, portanto o gráfico obtido é o mesmo presente na FIG.50.

Da análise do gráfico da FIG.51 nota-se que o valor do custo do Be é da ordem de 100 vezes maior do que a média do valor encontrado para os aços, o que inviabiliza o seu uso para a fabricação do recipiente externo, uma vez que encarece o custo total do embalado.

FIGURA 51. Valores de densidade em relação ao preço de mercado (valores constantes no banco de dados), apresentando alguns dos materiais que figuram como candidatos à utilização para o recipiente externo do embalado.

Dessa forma, para o recipiente externo, os materiais selecionados se encontram na família dos aços e das ligas de níquel (Ni). Dos aços, aquele que apresenta a maior quantidade de tipos possíveis é o aço inoxidável. Das ligas de Ni, são encontradas principalmente ligas do tipo níquel-cromo (Ni-Cr) e do tipo níquel-ferro-cromo (Ni-Fe-Cr). Entretanto, os aços inoxidáveis apresentam um preço significativamente reduzido quando comparado às ligas de Ni, apresentando vantagem em sua escolha.

Com relação ao aço, a capacidade instalada de produção do parque siderúrgico brasileiro é de 48 milhões de toneladas, sendo o Brasil o nono produtor mundial ^[37]. Então não haveria problema no fornecimento dos aços para a confecção do embalado.

Quanto ao Ni, o país conta com uma reserva de pouco mais de 10 milhões de toneladas e há, ainda, diversos projetos previstos e alguns em andamento, para aumentar a produção de Ni no Brasil ^[38].

Por fim, o Brasil é praticamente o único produtor de Cr no continente americano, entretanto suas reservas do minério não são tão expressivas quanto o Fe e o Ni. Entretanto, como o Cr, neste caso, seria utilizado para a formação da liga, a quantidade exigida seria de baixa magnitude.

Portanto, para o revestimento externo, os aços e as ligas de Ni são indicadas, com maior vantagem para o aço, pelo seu custo reduzido quando comparado às ligas de Ni.

8.2.4 Recipiente interno

Considerando-se os mesmos requisitos de projeto utilizados para a parte referente ao recipiente externo, seguiu-se o fluxograma da FIG.52.

FIGURA 52. O fluxograma apresenta os requisitos considerados para a seleção de materiais para o recipiente interno.

Pode-se verificar que o fluxograma presente na FIG.52 é semelhante ao encontrado na FIG.44, sendo que na FIG.44 a quantidade de requisitos é maior do que aqueles presentes na FIG.52. Isso porque a função do recipiente interno é realizar a manipulação do conteúdo radioativo – na área quente, após a abertura do embalado, o recipiente é içado para que se realize a retirada do conteúdo radioativo. Posteriormente, o conteúdo radioativo é manipulado nas células quentes, a fim de ser fracionado em pequenas porções.

Dessa forma, uma vez que os requisitos de projeto do recipiente interno constam nos requisitos exigidos para o recipiente externo, os resultados obtidos para esta parte do embalado pode ser atrelado àquela. Como pode ser visto na TAB.1, a maioria dos embalados descritos na lista *RAMPAC* apresenta material de mesma família, tanto para o recipiente externo quanto para o interno.

CAPÍTULO 9 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi selecionar materiais capazes de viabilizar a fabricação de um embalado para o transporte de Mo-99, cujo produto do decaimento é utilizado para fins diagnósticos na medicina nuclear. Para tanto, o trabalho foi dividido em etapas, para sua melhor organização e compreensão. Neste capítulo são apresentadas as conclusões feitas após a análise dos resultados obtidos.

Da análise de um embalado encontrado no Centro de Radiofarmácia do IPEN, em conjunto com diversos outros modelos encontrados na lista RAMPAC, foi verificado que, de maneira geral, os embalados do Tipo B são constituídos por quatro partes principais: recipiente interno, blindagem, proteção térmica/impacto e recipiente externo.

Do ponto de vista da finalidade essencial de um embalado, a contenção da radiação é de extrema importância, então a parte referente à blindagem foi a primeira a ser analisada. Utilizando o programa ESTAR, foi verificada que a energia da radiação de freamento produzida na emissão dos fótons provenientes do decaimento do Mo-99 apresenta ordem de grandeza dez vezes menor (quando comparada aos fótons emitidos devido à emissão de radiação γ), não sendo levada em consideração no cálculo da espessura da blindagem. Da seleção de materiais, aqueles que atenderam aos requisitos de projeto se encontram na família das ligas de chumbo e das ligas de tungstênio. Foram então calculadas as espessuras necessárias para que a intensidade da radiação seja reduzida à metade (HVL) e a um décimo (TVL) de sua intensidade inicial; dos resultados obtidos tem-se que as ligas de W são as mais indicadas por apresentarem espessura aproximadamente duas vezes menor do que a espessuras encontradas para o chumbo.

Com relação à parte que desempenha a proteção térmica/impacto, a família das madeiras apresentou os melhores resultados. Além das madeiras, estão inclusos nos possíveis materiais os aglomerados e compensados de madeira de diversos tipos, sendo estes os mais indicados para aplicação desejada, pelo baixo custo e facilidade de conformação.

Quanto aos materiais obtidos na seleção de materiais para a fabricação do recipiente externo, os aços e as ligas de Ni foram indicados, com maior vantagem para o

aço, pelo seu custo reduzido quando comparado às ligas de Ni.

Finalmente, uma vez que os requisitos de projeto do recipiente interno constam nos requisitos exigidos para o recipiente externo, os resultados obtidos para esta parte do embalado foram considerados os mesmos. Inclusive, a maioria dos embalados descritos na lista *RAMPAC* apresenta material de mesma família, tanto para o recipiente externo quanto para o interno.

CAPÍTULO 10 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, são sugeridas as seguintes linhas de pesquisa:

- Caracterização de ligas de tungstênio para utilização na fabricação da blindagem de embalados utilizados no transporte de materiais radioativos;
- Investigação das possíveis geometrias para a fabricação das partes constituintes da blindagem do embalado;
- Estudo da afinidade químico-física entre as superfícies dos materiais que formam o embalado;
- Desenvolvimento de um projeto e protótipo de embalado;
- Avaliação das propriedades físicas, mecânicas e químicas do embalado, após este ser submetido aos ensaios prescritos na Norma 5.01 da CNEN.

ANEXO *Ensaaios para embalados*

A.1 PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS PARA OS ENSAIOS

A.1.1 Antes dos ensaios, a amostra do embalado deve ser examinada de modo a identificar possíveis defeitos ou danos, incluindo os seguintes:

- a) divergência com relação ao projeto;
- b) defeitos de construção;
- c) corrosão e outras deteriorações; e
- d) distorção de características.

A.1.2 O sistema de contenção do embalado deve estar claramente especificado.

A.1.3 As características externas da amostra do embalado devem estar claramente identificadas de modo a tornar simples e precisas as referências a quaisquer partes da amostra.

A.2 ENSAIOS PARA DEMONSTRAR A CAPACIDADE DE RESISTÊNCIA EM CONDIÇÕES NORMAIS DE TRANSPORTE

A.2.1 Disposições gerais:

A.2.1.1 As amostras devem ser submetidas aos seguintes ensaios, na ordem indicada:

- a) ensaio de jato de água;
- b) ensaio de queda livre;
- c) ensaio de empilhamento; e
- d) ensaio de penetração.

A.2.1.2 Pode-se empregar uma única amostra para todos os ensaios citados em A.2.1.1, desde que:

- a) o intervalo entre o ensaio com o jato de água e os demais seja tal que a água possa embeber a amostra o máximo possível, sem que a parte externa da amostra fique apreciavelmente seca;

b) na ausência de qualquer evidência em contrário, o intervalo de tempo deve ser considerado como sendo de 2 horas se o jato de água é aplicado simultaneamente nas quatro direções; e

c) caso o jato de água seja aplicado sucessivamente nas quatro direções, não há necessidade de se considerar um intervalo de tempo.

A.2.2 Ensaio de jato de água

A amostra deve ser submetida a um jato de água que simule uma chuva com uma precipitação de aproximadamente 5 cm por hora, durante, no mínimo, 1 hora.

A.2.3 Ensaio de queda livre

A amostra deve cair, em queda livre, sobre um alvo, de modo a sofrer o máximo de dano com relação aos aspectos de segurança a serem ensaiados, de acordo com os seguintes requisitos:

a) a altura da queda, do ponto mais inferior da amostra até a superfície superior do alvo, deve ser, no mínimo, igual àquela estabelecida na TAB.I;

b) para embalados contendo material físsil, o ensaio deve ser precedido por uma queda livre de 30 cm em cada canto ou, no caso de embalado cilíndrico, em cada quarto das arestas circulares;

c) para embalados de madeira ou de fibras aglomeradas com massas inferiores a 50 kg, uma amostra distinta deve ser submetida a uma queda livre de 30 cm em cada um dos cantos; e

d) para embalados cilíndricos de fibras aglomeradas com massas inferiores a 100 kg, uma amostra distinta deve ser submetida a uma queda livre de 30 cm em cada quarto das arestas circulares.

Tabela I. Distância de queda livre para ensaio de embalados em condições normais de transporte.

Massa do embalado - M (kg)	Distância de queda livre (m)
$M < 5000$	1,2
$5000 \leq M < 10000$	0,9
$10000 \leq M < 15000$	0,6
$M \geq 15000$	0,3

A.2.4 Ensaio de empilhamento

A menos que a forma da embalagem não permita empilhamento, a amostra deve ser submetida a uma carga de compressão igual a maior das duas seguintes:

- a) a equivalente a 5 vezes a massa do embalado real; ou
- b) a equivalente a 13 kPa ($0,13 \text{ kgf.cm}^{-2}$) multiplicada pela área da projeção vertical do embalado (em cm^2).

A carga de compressão deve ser aplicada uniformemente aos dois lados opostos da amostra, um dos quais é a base sobre a qual o embalado repousa normalmente.

A.2.5 Ensaio de penetração

A amostra deve ser colocada sobre uma superfície rígida plana e horizontal, que não deve se deslocar significativamente durante o ensaio a ser realizado mediante os seguintes procedimentos:

- a) uma barra de aço com uma massa de 6 kg e com uma extremidade hemisférica com 3,2 cm de diâmetro é deixada cair, com seu eixo verticalmente orientado, no centro da parte mais frágil da amostra, de modo que, caso a barra penetre suficientemente na amostra, esta atinja o sistema de contenção; as deformações da barra devem ser desprezíveis após o ensaio; e
- b) a altura da queda da barra de aço, da sua extremidade inferior até a superfície externa da amostra, deve ser de 1 cm.

A.2.6 Ensaios adicionais para Embalados Tipo A projetados para gases e líquidos

Uma ou mais amostras distintas devem ser submetidas a cada um dos seguintes ensaios, a menos que possa ser demonstrado que, para a amostra em questão, um dos ensaios é mais rigoroso; neste caso, uma das amostras deve ser submetido ao ensaio mais rigoroso:

- a) ensaio de queda livre: a amostra deve cair, em queda livre, sobre um alvo, de modo a sofrer o máximo de dano; a altura de queda da parte mais inferior da amostra até a superfície superior do alvo deve ser de 9 m; e
- b) ensaio de penetração: a amostra deve ser submetida ao ensaio estabelecido em A.2.5, exceto que a altura da queda deve ser de 1,7 m.

A.3 ENSAIOS PARA DEMONSTRAR A CAPACIDADE DE RESISTÊNCIA EM CONDIÇÕES ACIDENTAIS DE TRANSPORTE

A amostra deve ser submetida aos efeitos cumulativos resultantes dos ensaios estabelecidos em A.3.1 a A.3.2, nesta ordem; após os ensaios, a amostra em questão, ou

uma amostra distinta, deve ser submetida ao ensaio de imersão estabelecido em A.3.3 ou, conforme aplicável, ao ensaio estabelecido em A.4.

A.3.1 Ensaio mecânico

O ensaio mecânico consiste de três ensaio de queda livre distintos: cada amostra deve ser submetida às quedas aplicáveis, conforme estabelecido na subseção 6.5, *alínea b*, da Norma; a ordem de submissão a esses ensaios deve ser tal que, após o ensaio mecânico, a amostra fique de tal modo danificada que, no ensaio térmico que se seguirá, seja produzido o máximo de dano.

a) queda I: a amostra deve cair sobre um alvo conforme especificado em A.2.1, de modo a sofrer o máximo de dano, de uma altura de 9 m do ponto mais inferior da amostra até a superfície superior do alvo;

b) queda II:

I - a amostra deve cair sobre uma barra de aço rigidamente fixada perpendicularmente no alvo, conforme especificado em A.2.1, de modo a sofrer o máximo de dano;

II - a altura da queda, do ponto de impacto na amostra até a superfície superior da barra, deve ser de 1 m; a barra deve ser de aço doce, com 20 cm de comprimento e possuir uma seção circular com $15\text{ cm} \pm 0,5\text{ cm}$ de diâmetro, deve-se utilizar uma barra mais comprida quando for produzir um dano maior;

III - a extremidade superior da barra deve ser plana e horizontal, e a sua aresta deve ser arredondada com um raio não superior a 6 mm.

c) queda III:

I - a amostra a ser submetida a um ensaio dinâmico de esmagamento deve ser posicionada no alvo conforme especificado em A.2.1, de modo a sofrer um máximo de dano quando sujeita ao impacto de uma massa de 500 kg em queda livre de uma altura de 9 m; e

II - a massa deve consistir de uma placa sólida de aço doce, quadrada, com 1 m de lado, e deve cair horizontalmente sobre a amostra; a altura da queda a considerar é a distância entre a superfície inferior da placa e o ponto mais superior da amostra.

A.3.2 Ensaio térmico

O ensaio térmico deve desenvolver-se do seguinte modo:

a) envolver completamente a amostra a ser ensaiada, exceto para um sistema de suporte simples, num fogo resultante da combustão de um combustível hidrocarbonado com ar, durante 30 minutos, em condição ambiental suficientemente calma para prover um coeficiente de emissividade média, no mínimo, igual a 0,9;

b) a temperatura média da chama deve ser de 800 °C e a fonte de combustível deve se estender, horizontalmente, além da superfície externa da amostra, no mínimo 1 m e, no máximo 3 m; a amostra deve ser posicionada a 1 m de distância da superfície da fonte;

- c) pode-se empregar qualquer outro ensaio cujas características térmicas sejam equivalentes às citadas em a e b;
- d) após cessar a aplicação do calor externo, a amostra deve resfriar lentamente, e qualquer combustão de materiais da mesma deve prosseguir naturalmente;
- e) para fins de demonstração, o coeficiente de absorção superficial deve ser de 0,8, ou igual ao valor comprovado do embalado nas condições de exposição ao fogo acima citadas; o coeficiente de convecção deve ser igual àquele justificado pelo projetista caso o embalado fosse exposto ao fogo com as características citadas;
- f) com relação às condições iniciais do ensaio térmico, a demonstração da conformidade deve ser realizada considerando-se a hipótese de que o embalado estava a uma temperatura de equilíbrio ambiental de 38 °C; os efeitos da radiação solar podem ser desprezados antes e durante o ensaio, mas devem ser levados em consideração na subsequente avaliação da resposta do embalado.

A.3.3 Ensaio de imersão em água

A amostra deve ser imersa sob uma camada de água com, no mínimo, 15 m de altura, durante um período mínimo de 8 horas, numa posição capaz de acarretar o máximo de dano. Para fins de demonstração, uma pressão manométrica externa no mínimo igual a 150 kPa (1,5 kgf.com⁻²) deve ser adotada.

A.4 VERIFICAÇÃO DA INTEGRIDADE DO SISTEMA DE CONTENÇÃO E DA EMBALAGEM

Após a realização dos ensaios estabelecidos em A.2 e A.3, deve-se:

- a) identificar e registrar defeitos e danos; e
- b) verificar se a integridade do sistema de contenção e da blindagem está de acordo com as exigências estabelecidas na Norma.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 PAZ, A.S. Tecnologia nacional na produção de radiofármacos. **Sociedade Brasileira de Controle de Contaminação**, ed. 45, p. 24-31, 2010. Disponível em: <[www.sbcc.com.br/revistas_pdfs/ed 45/30.IPEN.pdf](http://www.sbcc.com.br/revistas_pdfs/ed%2045/30.IPEN.pdf)>. Acesso em: 27 mai. 2012.
- 2 SANTOS, S. Ministro visita fábrica de radiofármacos do Ipen – Site do MCTI. **IPEN**, 2012. Seção Notícias. Disponível em: <<http://www.ipen.br/sitio/?idz=1&idc=11490>>. Acesso em: 27 mai. 2012.
- 3 ARAÚJO, E.B. A Utilização do elemento tecnécio-99m no diagnóstico de patologias e disfunções dos seres vivos. **Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola**, São Paulo, 2005. Disponível em: <<http://qnint.sbq.org.br/qni/visualizarTema.php?idTema=51>>. Acesso em: 29 jul. 2014.
- 4 LENHARO, M. Mundo pode sofrer escassez de material radioativo para a medicina. **PORTAL G1**, São Paulo, 2014. Seção Ciência e Saúde. Disponível em: <<http://g1.globo.com/ciencia-e-saude/noticia/2014/01/mundo-pode-sofrer-escassez-de-material-radioativo-usado-em-medicina.html>>. Acesso em: 24 jun. 2014.
- 5 AQUINO, A.R.; VIEIRA, M.M.F. Molibdênio-99, crise e oportunidade. **Scientific American Brasil**, 2010. Edição 98. Disponível em: <http://www2.uol.com.br/sciam/artigos/molibdenio-99_crise_e_oportunidade_imprimir.html>. Acesso em: 11 jun. 2014.
- 6 CNEN e SBMN participam de reunião na França para discutir possível crise no fornecimento de molibdênio 99. **CNEN**, 2014. Seção Notícias. Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br/noticias/lst-noticias-informe.asp?ano=2014&num=2>>. Acesso em: 11 jun. 2014.
- 7 AMARAL, F.; SAMPAIO, M. Reunião na França discute possível crise no fornecimento de radioisótopo. **Atividades Nucleares**, ano 5, n°57, 2014. Disponível em: <<http://www.atividadesnucleares.com.br/newsletter/AN57.pdf>>. Acesso em: 11 jun. 2014.
- 8 ASHBY, M. **Seleção de Materiais no Projeto Mecânico**. 4. ed. Rio de Janeiro, R.J.: Elsevier, 2012.
- 9 ATKINS, P.; JONES, L. **Princípios de Química: Questionando a Vida Moderna e o Meio Ambiente**. 3. ed. Porto Alegre, RS: Bookman Editora, 2006.
- 10 CARDOSO, E.M. **Programa de Integração CNEN – Módulo de Informação Técnica**. São Paulo, SP: CNEN, 1992.
- 11 EISBERG, R. ; RESNICK, R. **Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas**. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier, 1979.
- 12 TAUHATA, L.; SALATI, I.P.A.; DI PRINZIO, R.; DI PRINZIO, A. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos**. 8. ed. Rio de Janeiro, RJ: IRD/CNEN, 2011.
- 13 TURNER, J.E. **Atoms, Radiation and Radiation Protection**. 3. ed. KGaA, Weinheim: WILEY-VCH GmbH & Co., 2007.

- 14 OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. **Física das Radiações**. 1. ed. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2010.
- 15 AlluraXper FD10. **Medicina - Exames Modernos**. Disponível em: <<http://medicinaexamesmodernos.blogspot.com.br/>>. Acesso em: 25 jul. 2014.
- 16 Segami highlights fusion, scheduling upgrades. **AuntMinnie.com**. Disponível em: <<http://www.auntminnie.com/index.aspx?sec=ser&sub=def&pag=dis&ItemID=71249>>. Acesso em: 28 jul. 2015.
- 17 CERVERA, M. **^{99m}Tc Production Processes: an Examination of Proposals to Ensure Stable North American Medical Supplies**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Colorado State University, Colorado. Disponível em: <https://www.cvmb.colostate.edu/erhs/Health%20Physics/99mTc_Production_in_North_America.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2013.
- 18 LAVINAS, T. **Purificação do Molibdênio-99, Obtido a Partir da Fissão do Urânio-235, Utilizando-se a Resina Chelex-100**. 1998. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo. Disponível em: <http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Tatiana%20Lavinas_M.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2014.
- 19 GUARDIA, E. RMB: em 2018, autossuficiência na produção de radioisótopos. **Brasil Nuclear**, ano 19, n.40, p. 8-11, 2013.
- 20 **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constitui%C3%A7ao.htm> Acesso em: 28 de maio de 2012.
- 21 COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Termo de Referência – Controle da Atividade de Transporte de Materiais Radioativos no Brasil**. São Paulo, SP: CNEN, 2007.
- 22 COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Transporte de Materiais Radioativos**. São Paulo, SP: CNEN, 1988.
- 23 Package design no. 4001A/ Package Name: SAFSHIELD . **CROFT**. Disponível em: <http://www.croftltd.com/products/prod_sheets/4001a.php>. Acesso em: 1 jun. 2014.
- 24 Package design no. 2835A/ Package Name: SAFKEG. **CROFT**. Disponível em: <http://www.croftltd.com/products/prod_sheets/2835a.php>. Acesso em: 1 jun. 2014.
- 25 GRAY,P. Importance of Nuclear Medicine Products. In: INMM WORKSHOP ON REDUCING THE RISK FROM RADIOACTIVE AND NUCLEAR MATERIALS, 2009, Albuquerque. **Anais eletrônicos...** Albuquerque: INMM, 2009. Disponível em: <http://www.inmm.org/AM/Template.cfm?Section=Past_Events&Template=/CM/ContentDisplay.cfm&ContentID=2991>. Acesso em: 24 jun. 2014.
- 26 DOE Certificates of Compliance: banco de dados. In: RAMPAC - Radioactive Material Packaging. Disponível em: <<http://rampac.energy.gov/certinfo/certificates/doe/default.aspx>>. Acesso em: 20 jun. 2014.
- 27 FIRESTONE, R.B. **Table of Isotopes**. CD-ROM Edition. Berkeley, CA: Wiley-Interscience, 1996.

- 28 SUMÁRIO MINERAL 2014. **Molibdênio**. Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM, Brasil, 2014.
- 29 BALANÇO MINERAL BRASILEIRO 2001 FIRESTONE, R.B. **Zircônio**. Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM, Brasil, 2001.
- 30 SUMÁRIO MINERAL 2014. **Zircônio**. Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM, Brasil, 2014.
- 31 SUMÁRIO MINERAL 2014. **Chumbo**. Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM, Brasil, 2014.
- 32 SUMÁRIO MINERAL 2014. **Tungstênio**. Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM, Brasil, 2014.
- 33 DENSIMET® - INERMET®: High Performance Materials for Shielding and Aerospace Applications. **PLANSEE**. Disponível em:
<http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=OCB8QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.plansee.com%2Fpdfs%2FDensimet_Inermet_forShieldingandAerospace.pdf&ei=QFroVLatEsuwggS37YD4Cw&usg=AFQjCNGNxRX56twDsl-J39O8e2tSQDxcuQ&bvm=bv.86475890,d.eXY>. Acesso em: 1 jun. 2014.
- 34 WOLFMET - Tungsten Heavy Alloy. **M&I Materials**. Disponível em:
<<http://www.wolfmet.com/>>. Acesso em: 19 out. 2014.
- 35 CALLISTER JR., W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2008.
- 36 Madeiras Comerciais: banco de dados preparado por Richter, H.G. e Dallwitz, M.J. Versão 2009. Disponível em: <<http://delta-intkey.com/wood/pt/index.htm>> . Acesso em: 15 dez. 2014.
- 37 SUMÁRIO MINERAL 2014. **Aço**. Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM, Brasil, 2014.
- 38 SUMÁRIO MINERAL 2014. **Níquel**. Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM, Brasil, 2014.
- 39 SUMÁRIO MINERAL 2014. **Cromo**. Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM, Brasil, 2014.