

**Cálculo de dose em indivíduo do público devido à
queda de embalado com rejeito de baixo e médio nível
de radiação em canal pluvial da Central Nuclear
Almirante Álvaro Alberto**

Mateus Vieira Cunha

Projeto de Graduação apresentado ao
Curso de Engenharia Nuclear da Escola
Politécnica, Universidade Federal do Rio
de Janeiro, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de
Engenheiro.

Orientador: Paulo Fernando Ferreira
Frutuoso e Melo
Antônio Sergio de Martins Alves

Rio de Janeiro

Dezembro de 2016

Cálculo de Dose em Indivíduo do Público devido à queda de embalado de rejeito de baixo e médio nível de radiação em canal pluvial na Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto.

Mateus Vieira Cunha

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA NUCLEAR DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO NUCLEAR.

Examinado por:

Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo.

Dr. Antônio Sergio de Martins Alves

Prof. Ademir Xavier da Silva

Prof. Pedro Luiz da Cruz Saldanha

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

Dezembro de 2016

Cálculo de Dose em Indivíduo do Público devido à queda de embalado com rejeito de baixo e médio nível de radiação em canal pluvial na Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto./ Mateus Vieira Cunha – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2016.

XI, 54, p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Projeto de Graduação – UFRJ/ POLI/ Curso de Engenharia Nuclear, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 34-35.

1. Dispersão em meio aquático. 2. Dose radiológica. 3. Rejeito radioativo de baixo e médio nível de radiação .4.Modelo de lixiviação. I. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Curso de Engenharia de Produção. III. Cálculo de dose em indivíduo do público devido à queda de embalado com rejeito de baixo e médio nível de radiação em canal pluvial da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Nuclear.

Cálculo de Dose em Indivíduo do Público devido à queda de embalado com rejeito de baixo e médio nível de radiação em canal pluvial na Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto.

Mateus Vieira Cunha

Dezembro/2016

Orientador: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Curso: Engenharia Nuclear

Resumo

Atualmente, o Prédio de Monitoração (PM) do Centro de Gerenciamento de Rejeitos (CGR) da Central Nuclear de Almirante Álvaro Alberto (CNAAA), Angra dos Reis, RJ, encontra-se na fase final do seu processo de licenciamento nuclear junto à Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Um dos acidentes postulados no Relatório Final de Análise de Segurança para este prédio é a queda de um embalado contendo rejeito de baixo e médio nível de radiação proveniente da operação das usinas nucleares Angra 1 e 2 no canal nº 5 da CNAAA. A queda do embalado pode levar à liberação de material radioativo do mesmo por processos de lixiviação e depois carregado até o mar pela dispersão de material radioativo em águas superficiais, o que devido à geografia do local poderia causar dose radiológica em um indivíduo do público por ingestão de alimento marinho local contaminado. Para avaliar este cenário, foram levantados dados sobre o canal e parâmetros físicos dos embalados previamente identificados como de maior atividade pela Eletronuclear. Foram consideradas nos cálculos as quedas não simultâneas de um tambor de resina exaurida do primário de Angra 1 (com matriz de argamassa de cimento), de um tambor de resina exaurida do primário de Angra 2 (com matriz de betume) e de um tambor com rejeito compactado de Angra 2. A liberação de radionuclídeos do embalado para a água do canal, desta para o mar e a dose radiológica em indivíduos do público foram determinadas utilizando-se modelos analíticos de lixiviação, de transporte de substância radioativa em águas superficiais e de cálculo de dose, respectivamente. Esses modelos foram utilizados no desenvolvimento de programas de computador (códigos computacionais) no Mathematica 10.0. Os cálculos de dose foram realizados para um tempo de duração do acidente igual a 1 ano (tempo de liberação de atividade) e os resultados obtidos foram comparados com o limite de dose, estipulado pela CNEN para situações de emergência, igual a 10^{-1} Sv. A dose no indivíduo do público foi calculada para seis grupos etários onde a maior dose encontrada foi de $9,5\mu\text{Sv}$ para o grupo etário de 7 a 12 anos, valor que corresponde a 3,8% do limite de dose anual para a operação de cada usina e $9,5 \times 10^{-3}\%$ do limite de dose para situações de emergência.

Palavras-chave: Rejeito radioativo, Baixo nível de radiação, Médio nível de radiação, Dose, Modelo de lixiviação, Modelo de lavagem, dispersão de radionuclídeos em meio aquático.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Nuclear Engineer.

Dose evaluation on the public due to low and medium level radioactive waste release in a stormwater channel in Almirante Alvaro Alberto Nuclear Power Plant

Mateus Vieira Cunha

December/2016

Advisor: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Antonio Sérgio de Martin Alves

Course: Nuclear Engineering

Abstract

Currently, the Monitoring Building (PM) of the waste management center of the Almirante Alvaro Alberto Nuclear Power Plant (CNAAA), Angra dos Reis, RJ approaches the final stage of its nuclear licensing process at the National Commission of Nuclear Energy. One of the accident scenarios postulated in its Final Safety Analysis Report (FSAR) is the package drop of low and medium radiation levels inside the stormwater channel (channel nr. 5) of CNAAA, during its transfer from Angra 1 and 2 NPPs to storage (CGR). The drop of the package in the channel may lead to a release of its radioactive contents in water through a leaching process. This radioactive material will be carried into the sea by the dispersion in surface water, contaminating fishes and shellfishes in the area. The ingestion of those may produce radiological impact on public members, which can be assessed by calculating the radiological dose due to the accident. In order to evaluate this scenario, data on the stormwater channel of CNAAA and the physical parameters of the packages, previously identified by Eletronuclear as the highest activity, have been collected. The non-simultaneous drops into the channel of an exhausted resin drum of the primary circuit of Angra 1 (with cement mortar matrix), an exhausted resin drum of the primary circuit of Angra 2 (with bitumen matrix) and a drum with compacted waste of Angra 2 were considered in the calculations. The release of radionuclides from the package to the stormwater, its dispersion through the stormwater to the sea and the dose on public members were determined by analytical models for leaching, transport of radioactive material in surface water and dose calculation, respectively. These analytical models were employed to develop computer programs (computational codes) in Mathematica 10.0. The dose calculations were performed for an elapsed accident time of 1 year (activity release time) and the obtained results were compared to the dose limit, stipulated by CNEN for emergency situations, equal to 10^{-1} Sv. The dose to a member of the public was calculated for six age groups and the highest value found was equal to $9,5 \mu\text{Sv}$ for the age group of less than or equal to 1 year, which represents only $9,5 \times 10^{-3}\%$ of the annual dose for emergency situation and 3.8% of the annual operational limit for each NPP.

Key words: Radioactive waste, low level waste, medium level waste, Dose, leaching model, washing model, radioactivity release in surface waters

Sumário

1	Introdução.....	1
2	Proposição do Problema.....	3
2.1	Termo fonte.....	3
2.2	Descrição do Sítio.....	5
2.3	Premissas do acidente.....	7
3	Modelagem e Teoria.....	10
3.1	Vazão volumétrica média e velocidade média da água no canal.....	10
3.2	Transporte de Radionuclídeos.....	10
3.3	Liberação da Atividade do Embalado.....	11
3.3.1	Taxa de infiltração de água na Matriz Sólida.....	12
3.3.2	Coeficiente de retardo.....	12
3.3.3	Taxa de lixiviação (ALF).....	12
3.3.4	Atividade no Embalado.....	12
3.3.5	Porcentagem da Atividade Liberada no Canal.....	13
3.3.6	Processo de "Lavagem".....	13
3.4	Concentração de Radionuclídeos na saída do canal.....	14
3.5	Cálculo da dose efetiva em indivíduo do público.....	14
4	Levantamento de Dados.....	16
4.1	Dados do Canal.....	16
4.2	Atividades dos Embalados.....	16
4.2.1	Atividade do rejeito compactado de Angra II.....	17
4.2.2	Atividade do Rejeito imobilizado de Angra I e II.....	18
4.3	Parâmetros das matrizes sólidas e do rejeito compactado.....	21
4.4	Propriedades químicas dos embalados.....	21
4.4.1	Fatores de Bioacumulação e Coeficiente de Distribuição.....	21
4.4.2	Tambor com Rejeito compactado de Angra II.....	22
4.4.3	Coeficientes de Retardo e Taxa de lixiviação para o rejeito imobilizado de Angra I	23
4.4.4	Coeficientes de Retardo e Taxa de lixiviação para o rejeito imobilizado de Angra II	23
4.5	Fatores de Uso e coeficiente de dose por ingestão.....	24
5	Resultados.....	25
5.1	Atividade liberada no canal.....	25
5.2	Lixiviação dos Radionuclídeos.....	26

5.3	Cálculo da Dose.....	28
6	Conclusão.....	32
	Referências	34

Lista de Figuras

Figura 1-	Vista dos Tambores de 200 litros de Angra I (setembro/2002) [3].	4
Figura 2-	Tambores de 200 litros de Angra II (setembro/2002)[3].	4
Figura 3-	Layout dos prédios da CNAAA com distâncias entre os Edifícios dos Reatores e do CGR.....	5
Figura 4-	Trajeto de 1,5km entre a usina nuclear Angra I e o CGR [4]	5
Figura 5-	Vista frontal do canal nº 5 da CNAAA.....	6
Figura 6-	Vista lateral do canal nº 5 da CNAAA com a ponte	6
Figura 7-	Vista do canal nº 5 estando na ponte	7
Figura 8-	Vista do canal nº 5 da pista lateral	7
Figura 9-	Representação esquemática da seção transversal do embalado (hipóteses 2 e 3).....	8
Figura 10-	Representação esquemática da seção longitudinal do embalado e do canal (hipótese 4).....	9
Figura 11 -	Representação esquemática do canal e do embalado em 3D	9
Figura 12-	Contribuição percentual de cada radionuclídeo para a atividade total do embalado com rejeito compactado de Angra II	18
Figura 13-	Contribuição percentual de cada radionuclídeo para a atividade total do embalado com rejeito imobilizado de Angra I	20
Figura 14-	Contribuição percentual de cada radionuclídeo para a atividade total do embalado com rejeito imobilizado de Angra II.....	20
Figura 15-	Percentual da Atividade inicial de cada radionuclídeo liberada no canal (eixo vertical) contra o tempo em horas (eixo horizontal).....	Erro! Indicador não definido.
Figura 16-	Contribuição percentual de cada radionuclídeo para o total lixiviado no caso RC2.....	27
Figura 17-	Contribuição percentual de cada radionuclídeo para o total lixiviado no caso RP1	27
Figura 18-	Contribuição percentual de cada radionuclídeo para o total lixiviado caso RP2.....	28
Figura 19-	Contribuição percentual da dose gerada pela ingestão de peixes e crustáceos na dose total por faixa etária para o caso do RC2	29
Figura 20-	Contribuição percentual da dose gerada pela ingestão de peixes e crustáceos na dose total por faixa etária para o caso do RP1	30
Figura 21-	Contribuição percentual da dose gerada pela ingestão de peixes e crustáceos na dose total por faixa etária para o caso do RP2.....	30

Lista de Tabelas

Tabela 1-	Características dos Tambores analisados	4
Tabela 2-	Parâmetros do canal	16
Tabela 3-	Parâmetros do canal e do escoamento	16

Tabela 4- Atividade, meia vida e taxa de decaimento dos radionuclídeos presentes no RC2.....	17
Tabela 5-Atividade, meia vida e taxa de decaimento dos radionuclídeos presentes no RP1 and RP2	19
Tabela 6- Parâmetros das matrizes sólidas	21
Tabela 7- Propriedades Químicas dos radionuclídeos presentes nos Embalados	22
Tabela 8- Coeficientes de retardo dos elementos químicos presentes no embalado com rejeito imobilizado de Angra I.....	23
Tabela 9-Coeficientes de retardo dos elementos químicos presentes no embalado com rejeito imobilizado de Angra II	24
Tabela 10-Fatores de Uso para peixes e crustáceos para 6 diferentes faixas etárias .	24
Tabela 11-Atividades liberadas no canal e parcela da atividade dissociada da matriz para os 3 tipos de embalados.	25
Tabela 12- Dose ingerida no período de um ano para cada tipo de embalado e faixa etária.....	28

Lista de Siglas

- AIEA – Agência Internacional de Energia Atômica
- CGR- Centro de Gerenciamento de Rejeitos
- CNAAA- Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto.
- CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear
- FSAR – Final Safety Analysis Report
- NPP- Nuclear Power Plant
- PM – Prédio de Monitoração
- RC- Rejeito compactado
- RC2- Rejeito compactado de Angra II
- RFAS – Relatório Final de Análise de Segurança
- RP- Resina do primário
- RP1- Resina do primário de Angra I
- RP2- Resina do primário de Angra II
- UKA – Prédio Auxiliar do Reator (KKS)

Lista de Símbolos

a – Comprimento do canal

A – Área da seção transversal do canal

$A_{i,Lib}$ – Atividade liberada de cada radionuclídeo

A_r – Atividade residual

$A_{i,0}$ – Atividade inicial de cada radionuclídeo

ALF – Taxa de lixiviação

A_o – Atividade radiológica inicial

b – Largura do canal

B_a – Fator de bioacumulação acumulado

B_c – Fator de bioacumulação para crustáceos

B_p – Fator de bioacumulação para peixes

C – Concentração de radionuclídeos

D_{ef} – Dose efetiva

DF_{ing} – Coeficiente de Dose

D_{ing} – Dose ingerida

F – Fração do embalado submersa pela água do canal pluvial

H – Comprimento do embalado

i – Inclinação geodésica

K – Condutividade Hidráulica

k_d – Coeficiente de distribuição

n – Coeficiente de rugosidade de Manning

\dot{Q} – Taxa de liberação de atividade radiológica

q_w – Vazão volumétrica média

R_d – Coeficiente de retardo

R_h – Raio hidráulico

$t_{1/2}$ – Meia-vida dos radionuclídeos

U – Velocidade média da água no canal

x – Distância entre o embalado no canal e o ponto de deságue no mar

y – Diâmetro do embalado

λ – Constante de decaimento radioativo

ρ – densidade volumétrica

θ_w – Porosidade efetiva

1 Introdução

O Centro de Gerenciamento de Rejeitos (CGR) localizado na Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA) no município de Angra dos Reis, RJ, Brasil consiste em 3 depósitos destinados ao armazenamento de *liners* (recipientes cilíndricos de aço e concreto), tambores de 200 litros, caixas metálicas de 1m³, caixas metálicas B-25 (contendo tortas de tambores prensados), overpacks (embalagens cilíndricas de aço contendo tambores defeituosos) e VBAs (embalagens cilíndricas de concreto contendo tambores de 200 litros em seu interior) [1]. Essas embalagens foram preenchidas com rejeitos de baixo e médio níveis de radiação, consistindo de concentrado do evaporador (CE), filtro do sistema primário (F), rejeito compactado (RC), rejeito não compactado (RNC), resina exaurida do sistema primário (RP) e resina exaurida do sistema secundário (RS), provenientes da operação das Usinas Nucleares de Angra I e II e, futuramente de Angra III. Após a geração, esses embalados são transferidos da usina de origem (Angra 1 ou 2) para o CGR, utilizando-se um caminhão Munck de médio porte [1]. Eles ficarão armazenados neste local até serem transferidos para a sua deposição final no Repositório de Rejeitos de Baixo e Médio Níveis de Radiação (RBMN), que vem sendo projetado pelo CDTN/CNEN [2]. Esses embalados ficarão armazenados no RBMN até que, por decaimento radioativo, o limite de isenção estipulado pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) [3] seja atingido e o conteúdo dos embalados possa ser descartado como rejeito comum [1]. Um dos critérios de aceitação, para a deposição final do rejeito radioativo em um repositório, é a sua caracterização isotópica, onde são determinados os radionuclídeos constituintes do rejeito bem como os respectivos valores das atividades alfa, beta e gama. Com esta finalidade, a Eletronuclear projetou o Prédio de Monitoração (PM) que se encontra, atualmente, em fase final de construção, no interior das dependências do CGR. Para o licenciamento do PM e para a regularização do CGR junto à CNEN, foi elaborado o Relatório Final de Análise de Segurança (RFAS) desta instalação [4]. Dentre os cenários de acidentes postulados para o CGR destaca-se, por sua peculiaridade, a queda de embalados de baixo e médio nível de radiação no canal de águas pluviais (canal nº 5) da CNAAA, durante a sua transferência do Edifício auxiliar do Reator para o CGR. Neste cenário de acidente, considera-se que após a queda do embalado no canal, o seu conteúdo radioativo será inicialmente lixiviado para água do mesmo e depois arrastado até o mar pelo processo de dispersão em águas superficiais, contaminando peixes e crustáceos.

O objetivo deste trabalho é analisar este cenário acidental e determinar, com base em modelos analíticos, a lixiviação do material radioativo para a água do canal, sua dispersão ao longo deste até atingir o mar e a dose efetiva provocada no indivíduo do público devido à ingestão de peixes e crustáceos contaminados [5]. Com esse propósito, consideram-se as quedas não simultâneas de um tambor de resina exaurida do primário de Angra 1 (com matriz de cimento), de um tambor de resina exaurida do primário de Angra 2 (com matriz de betume) e de um tambor com rejeito compactado de Angra 2.

No segundo capítulo, é feita a proposição do problema, contendo o termo fonte, a descrição do sítio da CNAAA e as premissas do acidente. No próximo capítulo, é apresentada a modelagem matemática do transporte de radionuclídeos em águas pluviais a partir da equação geral de transporte e sua solução analítica para esse cenário, bem como a da dose equivalente em indivíduo do público via ingestão de animais marinhos, como recomendado por [2] para 6 faixas etárias diferentes como previsto pela CNEN [3].

Os dados sobre o inventário isotópico de cada tipo de embalado, atividade e meia Vida dos radionuclídeos envolvidos e outros parâmetros do cálculo da concentração de radionuclídeos na saída do canal estão dispostos no Capítulo 4. Os resultados são apresentados no Capítulo 5 e compreendem a atividade liberada no canal, a lixiviação dos radionuclídeos e o cálculo da dose.

Finalmente, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões

2 Proposição do Problema

2.1 Termo fonte

Para se desenvolver uma estimativa conservadora da dose em um indivíduo do público, causada por esse acidente, foram escolhidos 3 tipos de embalados, ou seja, um tambor de resina exaurida do primário de Angra 1 (com matriz de argamassa de cimento), um tambor de resina exaurida do primário de Angra 2 (com matriz de betume) e um tambor com rejeito compactado de Angra 2. De acordo com a norma CNEN-NE-8.01 ([3]), os rejeitos contidos no interior desses embalados são classificados como de baixo e médio níveis de radiação. Eles são definidos da seguinte maneira:

Resina exaurida do Primário (RP) - proveniente dos sistemas de purificação do refrigerante do primário, sistema de purificação da piscina de elementos combustíveis e sistema de processamento de rejeitos líquidos.

Rejeito compactado (RC) - são materiais compressíveis como materiais plásticos, papéis, luvas, roupas, triturados e compactados por prensa hidráulica para a redução de volume.

As resinas exauridas do primário são normalmente classificadas como rejeito de médio nível de radiação e, por isso, são encapsuladas no interior de tambores de aço de 200 litros e imobilizadas em matrizes sólidas de argamassa de cimento (Angra 1) e betume (Angra 2). A utilização de matrizes sólidas dificulta a dispersão do material radioativo no caso da deterioração da embalagem de aço e/ou no caso de infiltração de líquidos no interior do embalado.

Os rejeitos compactados, por possuírem baixo nível de radiação e após serem triturados, são prensados dentro de embalagens de aço para redução do volume. Dá-se o nome de embalado ao conjunto formado pela embalagem (normalmente um recipiente metálico ou de concreto) e pelo seu conteúdo (rejeito).

Para os rejeitos radioativos mencionados anteriormente, ou seja, as resinas exauridas do primário de Angra 1 e 2, e o rejeito compactado de Angra 2, são utilizados como embalagens os tambores de aço de 200 litros, mostrados nas Figs. 1 e 2. De acordo com [1], esses tambores atendem aos requisitos das normas NBR-6658, NBR-11.888 e ASTM-A-366, e suas principais características são apresentadas na Tabela 1. Os embalados por sua vez podem ser divididos em 3 categorias como mostrado na Tabela 1:

Tabela 1- Características dos Tambores analisados [3].

	Tambor de Angra I Imobilizado (RP1)	Tambor de Angra II Imobilizado (RP2)	Tambor de Angra II Compactado (RC2)
Tipo de rejeito	Resina exaurida do primário imobilizada em cimento	Resina exaurida do primário imobilizada em betume	Rejeito compactado
Material do tambor	Aço carbono	Aço carbono	Aço carbono
Capacidade	200 l	200 l	200 l
Altura total	875mm	928mm	928mm
Diâmetro interno	570mm	560mm	560mm
Diâmetro externo do anel de expansão	604mm	621mm	621mm

Neste trabalho são considerados os embalados com maiores valores de atividade de cada tipo, no capítulo 4 são listados os radionuclídeos presentes em cada um, assim como suas respectivas atividades e meias-vida.



Figura 1- Vista dos Tambores de 200 litros de Angra I (setembro/2002) [3].



Figura 2- Tambores de 200 litros de Angra II (setembro/2002)[3].

2.2 Descrição do Sítio

O CGR está localizado dentro do sítio da CNAAA, porém não diretamente na vizinhança das usinas de Angra I e II, como mostra a Figura 3



Figura 3- Layout dos prédios da CNAAA com distâncias entre os Edifícios dos Reatores e do CGR

Ao realizar o percurso de 1,5km entre a usina nuclear Angra 1 e o CGR (para Angra 2 o trajeto é um pouco diferente), destacado em vermelho na Fig. 4, o caminhão que carrega os tambores com rejeitos radioativos cruza a ponte sobre o canal nº 5 da CNAAAA, nas imediações da qual se postula que ele tombe ou capote e que o tambor caia no canal. Nas Figs. 5-8 são mostradas algumas fotografias do referido canal.



Figura 4-Trajeto de 1,5km entre a usina nuclear Angra I e o CGR [4]



Figura 5- Vista frontal do canal nº 5 da CNAAA



Figura 6- Vista lateral do canal nº 5 da CNAAA com a ponte



Figura 7- Vista do canal nº 5 estando na ponte



Figura 8- Vista do canal nº 5 da pista lateral

2.3 Premissas do acidente

Para o cenário de acidente de queda de embalado radioativo no interior do canal de águas pluviais (canal nº 5) da CNAAA, consideram-se as seguintes hipóteses:

- 1) O caminhão tomba/capota por falha humana ou mecânica e um tambor cai no canal;
- 2) O canal está cheio o suficiente para cobrir o embalado com água, como na Fig. 9, onde **a** representa o nível de água, **b** representa a largura do canal e **y** o diâmetro da matriz;
- 3) O canal está inclinado de um ângulo α em relação ao terreno e cada embalado possui um comprimento **H** como mostrado na Fig. 10;
- 4) Não é considerada para os cálculos a proteção devida à parte metálica externa do embalado, ou seja, o rejeito no canal pode ser considerado um cilindro com diâmetro e altura iguais ao diâmetro interno e altura do tambor;

- 5) Para o rejeito imobilizado em matriz sólida, a liberação de radionuclídeos é modelado como um processo de lixiviação. Esta mesma modelagem também é aplicada aos embalados contendo rejeito compactados, neste caso considerando valores do coeficiente de distribuição, k_d , iguais a zero para todos os radionuclídeos e o processo de lixiviação é denominado "lavagem";
- 6) Como o canal deságua no mar, a dose no indivíduo do público é calculada com base na ingestão de alimentos de origem marinha contaminados;
- 7) A dispersão da atividade dos radionuclídeos no mar é desprezada conservadoramente.

De acordo com [6], os embalados radioativos são transferidos por um caminhão Munk de médio porte desde os Prédios Auxiliares dos Reatores de Angra 1 e 2 até o CGR. Neste percurso (vide Fig. 4), o veículo passa por uma pequena ponte (vide Fig. 6) localizada sobre o canal nº 5 da CNAAA, e depois sobe uma pequena ladeira que margeia o canal. Neste ponto, considera-se o tombamento/capotamento do caminhão, fazendo com que um embalado radioativo caia no interior do referido canal pluvial (hipótese 1).

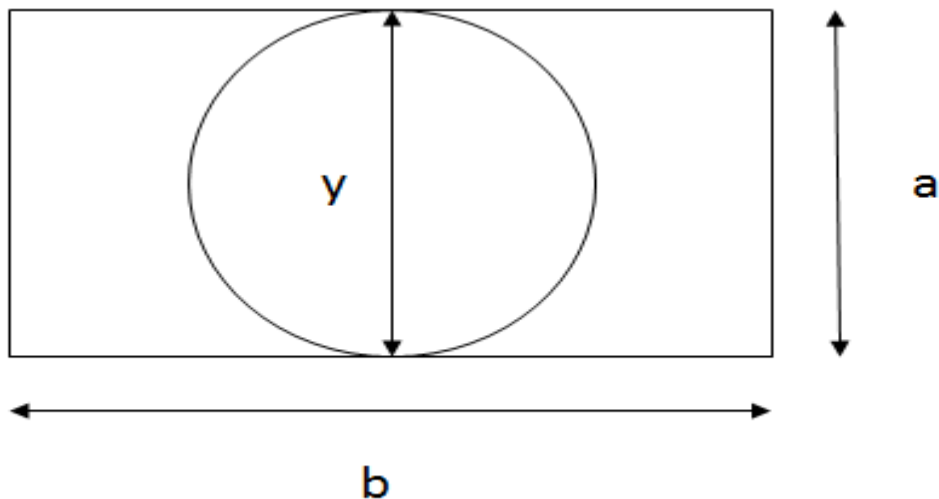


Figura 9- Representação esquemática da seção transversal do embalado (hipóteses 2 e 3)

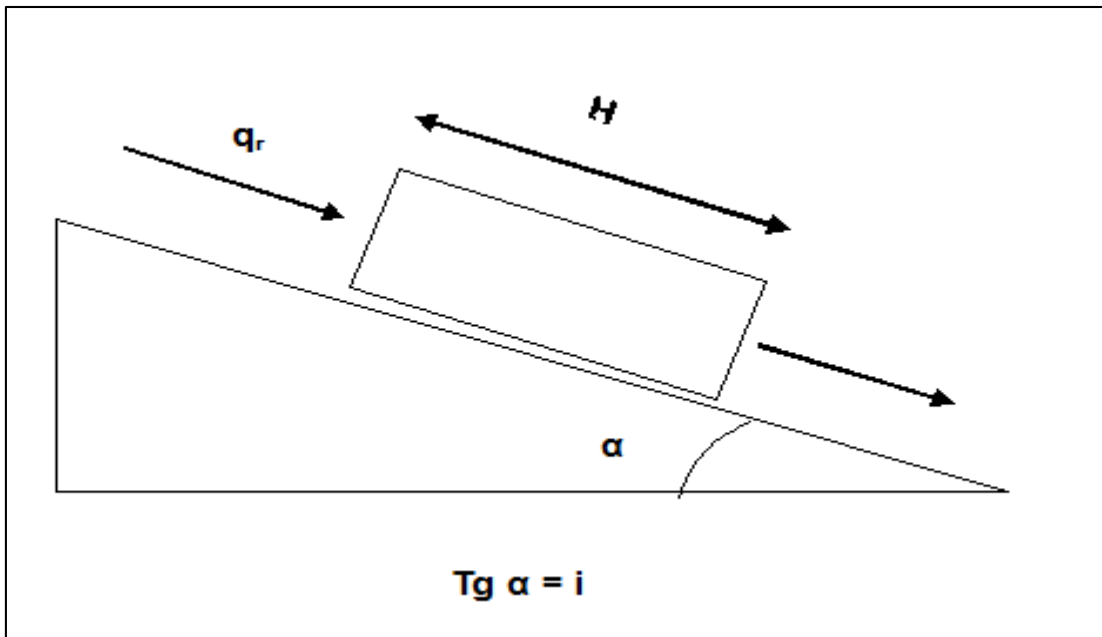


Figura 10- Representação esquemática da seção longitudinal do embalado e do canal (hipótese 4)

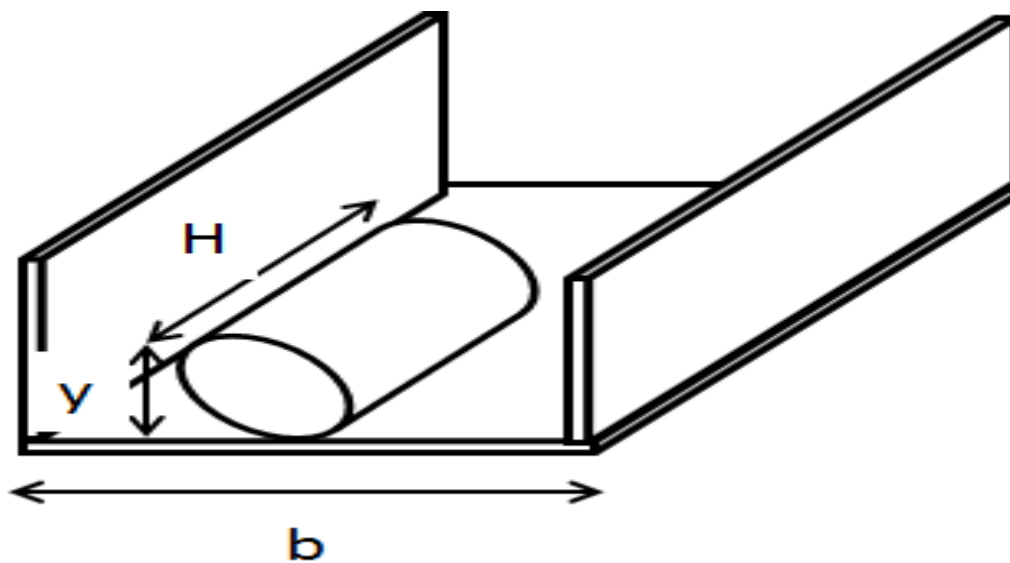


Figura 11 - Representação esquemática do canal e do embalado em 3D

3 Modelagem e Teoria

3.1 Vazão volumétrica média e velocidade média da água no canal

De acordo com [8], pode-se calcular o fluxo médio de água em um canal pluvial através da Eq.(1), conhecida como Fórmula de Manning.

$$q_w = \frac{A i^{1/2} R_h^{\frac{2}{3}}}{n} \quad (1)$$

onde:

A – Área da seção transversal do canal, neste caso dado por $\mathbf{b*y}$ (vide Figura 9),(m²);

i – Inclinação geodésica do canal estimado em [7];

R_h – Raio Hidráulico do Canal, neste caso dado por $\mathbf{A / (b+2y)}$ (vide Figura 9),(m);

n – Coeficiente de rugosidade de Manning, neste caso para a parede de concreto.

De posse da vazão volumétrica média, pode-se estimar a velocidade média de escoamento da água no canal na direção-x, \mathbf{U} , como mostrado na Eq. (2) ([9]):

$$U = \frac{q_w}{b*y} \quad (2)$$

3.2 Transporte de Radionuclídeos

Como explanado nas seções anteriores, é necessário modelar o escoamento no canal pluvial com o objetivo de se estimar a concentração de radionuclídeos na saída do mesmo, ou seja, em seu ponto de descarga no mar. De acordo com [10], esse escoamento pode ser modelado por uma equação diferencial tridimensional de adveccção-difusão, que em coordenadas cartesianas, pode ser escrita como :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} + (W - W_s) \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial(\epsilon_x \frac{\partial C}{\partial x})}{\partial z} + \frac{\partial(\epsilon_y \frac{\partial C}{\partial y})}{\partial y} + \frac{\partial(\epsilon_z \frac{\partial C}{\partial z})}{\partial z} - \lambda C \quad (3)$$

onde:

C - Concentração de radionuclídeos (Bq /m³);

t - Tempo (s);

U, V, e W - Componentes da velocidade nas direções x, y, e z respectivamente (m/s);

W_s - Velocidade de liberação de contaminantes no corpo d'água (m/s);

x, y, z - Direções longitudinal, lateral, e vertical (m);

ε_x, ε_y e ε_z - Coeficientes de dispersão nas direções x, y, e z (m²/ s);

λ - Constante de decaimento radioativo ($\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$) (s^{-1}).

Conservadoramente, supõe-se que a concentração em atividade, C , ao longo do canal nº 5 da CNAAA não é função de z e nem de y . Assim, a Eq. (3) se reduz à seguinte forma simplificada ([5]):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = -\lambda C \quad (4)$$

Considerando-se que o escoamento é em regime estacionário, então, observa-se que:

$$U \frac{\partial C}{\partial x} = -\lambda C \quad (5)$$

Tal equação tem solução da forma

$$C(x) = C_1 e^{-\left(\frac{\lambda x}{U}\right)} \quad (6)$$

onde C_1 é uma constante de integração.

Considera-se que a Eq.(6) obedece à seguinte condição de contorno ([5]):

$$C(0) = \dot{Q}/q_w, \quad \text{para } X = 0 \quad (7)$$

Onde

\dot{Q} – Taxa de liberação de atividade do tambor para a água do canal, (Bq/s)

q_w – Vazão volumétrica média de água que passa pelo canal, (m^3/s)

Substituindo-se a Eq. (7) na Eq. (6), obtém-se a seguinte equação para o transporte unidimensional de radionuclídeos em um canal pluvial:

$$C(x) = \frac{\dot{Q}}{q_w} e^{-\left(\frac{\lambda x}{U}\right)} \quad (8)$$

onde, de acordo com [5], deve-se utilizar na Eq. (8) um valor de q_w igual a um terço do valor obtido para esse parâmetro na Eq. (1).

3.3 Liberação da Atividade do Embalado

A lixiviação ocorre quando o rejeito, contido na fase sólida, entra em contato com água [11]. Neste trabalho, utilizam-se as metodologias descritas em [9] para solos e em [11] para radionuclídeos a fim de modelar a liberação da atividade do tambor para o canal, onde a água percola os grãos da matriz imobilizada (Angra I e II) carregando a atividade para o canal. São feitas em seguida, considerações pontuais no modelo para descrever o processo de lavagem que ocorre no rejeito compactado (Angra II).

3.3.1 Taxa de infiltração de água na Matriz Sólida

A taxa com que a água do canal se infiltra na matriz sólida, pode ser calculada com o auxílio da velocidade de Darcy, considerando-se a matriz como um meio poroso. A velocidade de Darcy pode ser assim definida [9].

$$V_{Darcy} = \frac{K \cdot i}{\theta_w} \text{ em } \left(\frac{m}{s}\right) \quad (9)$$

onde:

K – Condutividade hidráulica da matriz sólida, (m/s),

i – inclinação geodésica do canal neste caso 0,0349 (tg2°) estimado em [7].

θ_w - porosidade efetiva da matriz sólida, que é a porção da porosidade onde é possível o escoamento de água no meio poroso.

3.3.2 Coeficiente de retardo

O coeficiente de retardo, R_d , representa uma medida da capacidade de retenção da matriz sólida para o deslocamento de determinado elemento químico existente no líquido que percola a matriz e pode ser assim calculado [12]

$$R_d = 1 + \frac{\rho \cdot K_d}{\theta_w} \quad (10)$$

onde

K_d – Coeficiente de distribuição de cada elemento químico como definido em [9] (m³/kg)

3.3.3 Taxa de lixiviação (ALF)

A Taxa de lixiviação, ALF, expressa a razão entre a atividade liberada no canal devido à vazão de água que passa pelo embalado e a atividade remanescente na matriz sólida a cada intervalo de tempo. Esta taxa pode ser representada como [11]

$$ALF = \frac{V_{Darcy}}{H(\theta_w + \rho \cdot K_d)} \quad (11)$$

sendo H o comprimento do embalado.

3.3.4 Atividade no Embalado

A taxa de liberação de atividade é representada por

$$\dot{Q}_L = F \cdot ALF \cdot A_r \quad (12)$$

Onde A_r é a atividade residual no embalado no instante t , que pode ser representada como:

$$\frac{dA_r}{dt} = -(\lambda + F \cdot ALF)A_r \quad (13)$$

sendo F a fração do embalado submersa na água do canal pluvial. Neste trabalho, assume-se que o embalado está completamente submerso pela água do canal, ou seja, F=1.

Temos que

$$A_r = C_2 \cdot e^{-(\lambda + F \cdot ALF)t} \quad (14)$$

Considerando-se que no instante inicial ($t=0$), a atividade de cada radionuclídeo no embalado é igual a A_0 , então:

$$A_r = A_0 * e^{-(\lambda+ALF)t} \quad (15)$$

Finalmente, substituindo-se a Eq. (15) na Eq. (12), obtém-se:

$$\dot{Q}_L = (F * ALF)A_0 * e^{-(\lambda+ALF)t} \quad (16)$$

3.3.5 Porcentagem da Atividade Liberada no Canal

Visando se estimar a capacidade da matriz sólida e do rejeito compactado em reter os radionuclídeos, analisa-se a parcela da atividade inicial total que é liberada ao longo do tempo, A_{Lib} , desde a queda do embalado, que é dada pela Eq. (17):

$$A_{Lib} = \sum_i \frac{\int_{t_1}^{t_2} \dot{Q}_L dt}{A_0} = \frac{1}{A_0} * \sum_i \frac{A_{i,0} * ALF_i * (1 - e^{-t_2(\lambda_i + ALF_i)})}{(\lambda_i + ALF_i)} \quad (17)$$

A equação (18) pode ser utilizada para estimar a porcentagem de cada radionuclídeo individualmente, $A_{i,Lib}$ e determinar qual possui maior capacidade de se dissociar da matriz. Em ambos os casos, é considerado que o acidente se inicia no instante $t_1=0$. Assim:

$$A_{i,Lib} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \dot{Q}_L dt}{A_{i,0}} = \frac{ALF_i * (1 - e^{-t_2(\lambda_i + ALF_i)})}{(\lambda_i + ALF_i)} \quad (18)$$

3.3.6 Processo de "Lavagem"

Para o caso da queda do embalado com rejeito compactado de Angra II no canal, considera-se que a dispersão da atividade do rejeito para a água do canal ocorre através de mecanismos de "lavagem". Esta modelagem é similar à apresentada, anteriormente para as matrizes sólidas, diferindo basicamente nos valores dos coeficientes de distribuição, k_d , que são muito baixos para radionuclídeos presentes em rejeitos compactados.

Conservadoramente, considera-se que todos os radionuclídeos contidos no rejeito compactado têm valores de k_d iguais a 0 (hipótese 5). Consequentemente [vide Eq. (10)], os valores do coeficiente de retardo, R_d , são iguais a 1 para todos eles.

Ou seja, o embalado com rejeito compactado apresenta resistência quase nula à liberação do seu material radioativo.

3.4 Concentração de Radionuclídeos na saída do canal

A concentração em atividade do i -ésimo radionuclídeo na saída do canal, pode ser obtida substituindo-se a Eq.(16) na Eq.(8). Assim:

$$C_i(x) = \frac{(F*ALF)A_0 * e^{-(\lambda_i+F*ALF)t}}{q_w} e^{-\left(\frac{\lambda_i X}{U}\right)} \quad (19)$$

Onde a concentração total em atividade de radionuclídeos pode ser estimada somando-se a contribuição de cada radionuclídeo i .

3.5 Cálculo da dose efetiva em indivíduo do público

Como proposto, será estimada a dose efetiva em indivíduo do público para 6 diferentes faixas etárias devido à ingestão de peixes e crustáceos(hipótese 6). Seguindo o modelo de [5], observa-se que a concentração em atividade de radionuclídeos no alimento marinho, $C_{i,a}$, pode ser representada como:

$$C_{i,a} = C_{i,s} * B_a = C_{i,s} * (B_c + B_p) \quad (20)$$

onde $C_{i,s}$ é a concentração em atividade de radionuclídeos na saída do canal (hipótese 7), B_a é o fator de bioacumulação para cada elemento químico. B_c e B_p , são os fatores de bioacumulação para crustáceos e peixes, respectivamente.

A dose efetiva em um indivíduo do público, D_{ef} , pode agora ser calculada somando-se a contribuição de cada radionuclídeo, ou seja:

$$D_{ef} = \sum_i C_{i,a} * H_p * DF_{ing} \quad (21)$$

onde H_p é a taxa de consumo de cada tipo de alimento marinho para seres humanos e DF_{ing} é o fator de conversão de atividade para dose.

Como indicado na Eq. (22), a dose no indivíduo do público é proporcional ao tempo em que o embalado sofre lixiviação ou lavagem, ou seja, aumenta com o tempo de residência do embalado no canal. A progressão dessa dose no tempo pode ser calculada integrando a Eq. (21) ao longo do tempo. Assim, temos:

$$D_{ing} = \int_{t_1}^{t_2} \dot{D}_{ef} dt \quad (22)$$

Substituindo-se a Eq. (21) na Eq. (22), obtém-se:

$$D_{ing} = \sum_i (B_c + B_p) * H_p * DF_{ing} * \int_{t_1}^{t_2} \frac{(F*ALF)*A_0 * e^{-(\lambda_i+F*ALF)t}}{q_w} e^{-\left(\frac{\lambda_i X}{U}\right)} dt \quad (23)$$

Supondo que o acidente se inicie no instante $t_1=0$, a dose efetiva em um momento t_2 qualquer pode ser representada por:

$$D_{ing} = \sum_i \frac{(B_c+B_p)*H_p*DF_{ing}*e^{-\left(\frac{\lambda_i X}{U}\right)}*(F*ALF)*A_0*(1-e^{-(\lambda_i+F*ALF)t_2})}{q_w} \quad (24)$$

A fim de se comparar os valores de dose gerados por esse acidente com os limites anuais estipulados pela CNEN para a operação de cada usina, deve-se substituir t_2 pela quantidade de horas em um ano.

4 Levantamento de Dados

Esta seção traz um levantamento dos dados necessários para se efetuar o cálculo da dose em indivíduo do público como proposto no capítulo anterior. Primeiro são apresentados dados referentes à geometria e à vazão de água do canal, as atividades dos embalados em questão, a contribuição de cada radionuclídeo para a atividade total e suas respectivas meias-vidas e taxa de decaimento, fornecidos pela Eletronuclear [11],[7],[13]. Em seguida, são expostos os parâmetros relacionados às matrizes sólidas e ao rejeito compactado, tais como densidade, porosidade efetiva, condutividade hidráulica, os fatores de bioacumulação e coeficiente de distribuição. Por fim, as taxas de lixiviação e coeficientes de retardo para cada elemento químico, os fatores de uso por tipo de alimento marinho (peixes e crustáceos) e coeficientes de dose por ingestão são mostrados para os 6 diferentes grupos etários considerados.

4.1 Dados do Canal

De acordo com [7], observa-se que o canal possui uma seção transversal retangular como mostrado na Fig. 9. Adicionalmente, considera-se que o nível de água é igual ao diâmetro interno do embalado (hipótese 2). Na Tabela 2 são apresentados os valores da largura do canal, **b**, da inclinação geodésica do mesmo, **i**, do coeficiente de rugosidade de Manning, **n**, e da distância entre o embalado no canal e o ponto de deságue deste no mar, **x**.

Tabela 2- Parâmetros do canal

Parâmetro	Valor
b	6 m
i	0,0349
n	0,013
x	720 m

Constam da Tabela 3 os valores do diâmetro do embalado, **y**, o seu comprimento, **H**, a área da seção transversal do canal, **A**, o seu raio hidráulico, **R_h**, a vazão volumétrica média e a velocidade média da água no canal, representados por **q_w** e **U**, respectivamente.

Tabela 3-Parâmetros do canal e do escoamento

	Compactado Angra II	Imobilizado Angra I	Imobilizado Angra II
y (m)	0,56	0,57	0,56
H (m)	0,928	0,875	0,928
A (m²)	3,36	3,42	3,36
R_h (m)	0,47	0,48	0,47
q_w (m³/s)	29,27	30,09	29,27
U (m/s)	8,71	8,80	8,71

4.2 Atividades dos Embalados

Nesta seção, são apresentados os valores das atividades dos diversos radionuclídeos presentes no interior dos embalados, da constante de decaimento radioativo (determinada pela expressão $\lambda_i = \ln(2)/t_{1/2}$) e da contribuição percentual de cada radionuclídeo na atividade total desses embalados.

4.2.1 Atividade do rejeito compactado de Angra II

Valores de atividade, meia vida e constante de decaimento radioativo para os radionuclídeos presentes no rejeito compactado de Angra 2 (RC2) são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4- Atividade, meia vida e taxa de decaimento dos radionuclídeos presentes no RC2

Radionuclídeo	Atividade de Projeto Angra 2 ^a (Bq)	Meia Vida ^b t _{1/2}	Taxa de decaimento λ _i (1/h)
⁵⁸ Co	4,163.10 ⁸	70,8 d	4,079.10 ⁻⁴
⁶⁰ Co	2,997.10 ⁹	5,271 a	1,501.10 ⁻⁵
¹³⁴ Cs	2,775.10 ⁸	2,062 a	3,837.10 ⁻⁵
¹³⁷ Cs	1,210.10 ⁹	30 a	2,638.10 ⁻⁶
⁵⁴ Mn	2,294.10 ⁸	312,5 d	9,242.10 ⁻⁵
¹²⁴ Sb	1,998.10 ⁸	60,2 d	4,798.10 ⁻⁴
⁵⁹ Fe	1,11.10 ⁸	44,529 d	6,486.10 ⁻⁴
⁹⁵ Zr	1,221.10 ⁸	63,98 d	4,514.10 ⁻⁴
TOTAL	5,563.10 ⁹	-----	

^a Ref. /4/; ^b Ref. /13/ , d= dias , a =anos

Já a contribuição percentual de cada radionuclídeo, na atividade total do embalado com rejeito compactado de Angra II (RC2), é mostrada na Fig. 12. Observa-se, com o auxílio dessa figura, que o Co-60 contribui com mais de 50% da atividade total do embalado e a soma das atividades do Co-60 e Cs-137 corresponde a 75% da atividade total.

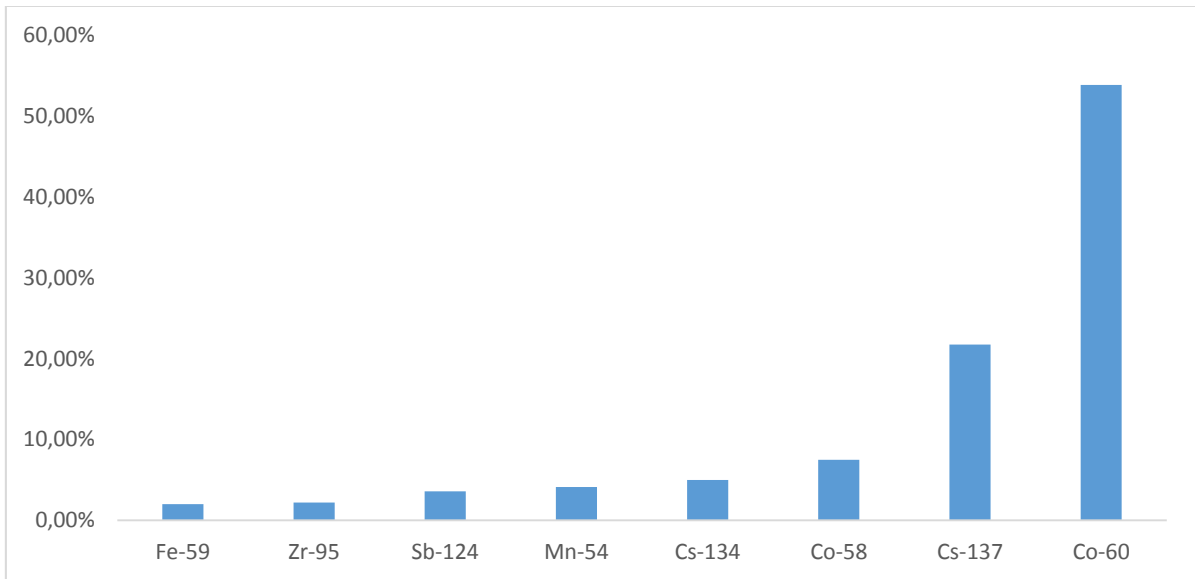


Figura 12- Contribuição percentual de cada radionuclídeo para a atividade total do embalado com rejeito compactado de Angra II

4.2.2 Atividade do Rejeito imobilizado de Angra I e II

Na Tabela 5 são apresentados os valores de atividade, meia vida e constante de decaimento radioativo para os radionuclídeos presentes nas resinas exauridas dos circuitos primários de Angra I (PR1) e II (RP2).

Tabela 5 -Atividade, meia vida e constantes de decaimento radioativo dos radionuclídeos presentes no RP1 e RP2

Radionuclídeo	Atividade de Projeto RP 1 ^a (Bq)	Atividade de Projeto RP 2 ^b (Bq)	Meia Vida ^c t _{1/2}	Constante de decaimento radioativo λ _i (1/h)
⁵⁴ Mn	6,29.10 ¹⁰	3,10.10 ⁹	312,5 d	9,242E-05
⁵⁹ Fe	2,40.10 ¹⁰	--	44,529 d	6,486E-04
⁵⁸ Co	8,58.10 ¹¹	3,89.10 ⁹	70,8 d	4,079E-04
⁶⁰ Co	8,58.10 ¹⁰	1,66.10 ¹⁰	5,271 a	1,501E-05
⁶³ Ni	--	2,02.10 ¹⁰	96 a	8,242E-07
⁶⁵ Zn	--	6,04.10 ⁸	243,9 d	1,184E-04
⁸⁹ Sr	3,32.10 ⁹	--	50,5 d	5,719E-04
⁹⁰ Sr	5,15.10 ⁸	4,56.10 ⁸	29,12 d	9,918E-04
⁹⁰ Y	5,03.10 ⁸	4,56.10 ⁸	64 h	1,083E-02
⁹¹ Y	5,83.10 ⁸	--	58,51 d	4,936E-04
⁹⁵ Zr	7,21.10 ⁸	--	63,98 d	4,514E-04
⁹⁵ Nb	1,08.10 ⁹	--	35,15 d	8,217E-04
⁹⁹ Mo	3,55.10 ¹⁰	--	66 h	1,050E-02
^{110m} Ag	--	1,00.10 ⁹	249,9 d	1,156E-04
¹²² Sb	--	3,34.10 ⁹	2,7 d	1,070E-02
¹²⁴ Sb	--	1,15.10 ¹⁰	60,20 d	4,798E-04
¹²⁵ Sb	--	5,40.10 ⁹	2,77 a	2,857E-05
¹³² Te	1,49.10 ¹⁰	--	25 min	1,664E+00
¹³¹ I	3,32.10 ¹¹	--	8,04 d	3,592E-03
¹³³ I	6,17.10 ¹⁰	--	20,8 h	3,332E-02
¹³⁵ I	1,14.10 ¹⁰	--	6,61 h	1,049E-01
¹³⁴ Cs	8,81.10 ¹⁰	1,16.10 ¹⁰	2,062 a	3,837E-05
¹³⁶ Cs	1,14.10 ⁹	--	13,1 d	2,205E-03
¹³⁷ Cs	4,35.10 ¹¹	6,23.10 ¹⁰	30 a	2,638E-06
^{137m} Ba	--	5,89.10 ¹⁰	2,552 min	1,630E+01
¹⁴⁰ Ba	9,15.10 ⁸	--	12,74 d	2,267E-03
¹⁴⁰ La	9,15.10 ⁸	--	40,272 h	1,721E-02
¹⁴⁴ Ce	9,84.10 ⁸	--	248,3 d	1,163E-04
¹⁴⁴ Pr	9,84.10 ⁸	--	17,28 min	2,407E+00
TOTAL	2,02.10 ¹²	1,993.10 ¹¹	-----	

^a FSAR de Angra 1. Volume de 0,080 m³ de resina por tambor. Ref. [15]

^b Ref. [16] ^c Ref. [14]

As contribuições percentuais de cada radionuclídeo nas atividades totais dos embalados contendo resinas exauridas dos primários de Angra I (RP1) e II (RP2) são apresentadas nas Figs. 13 e 14, respectivamente.

Fica evidente (vide Fig.13), que os maiores contribuidores para a atividade total do rejeito RP1 são os radionuclídeos Co-58 e Cs-137; juntos eles representam 64% da atividade total do embalado. Na Figura 14, pode-se notar que a participação do Cs-137 e do Ba-137m constituem 60% da atividade total do rejeito RP2. A explanação anterior (vide Figs. 13 e 14) evidencia o papel de destaque do Cs-137 nas atividades dos embalados analisados.

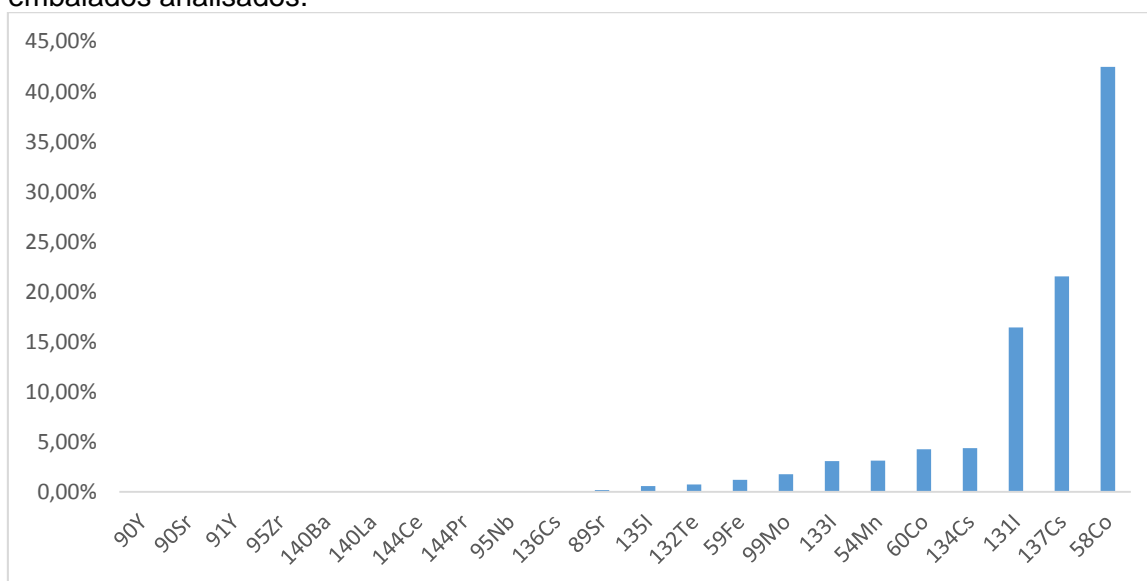


Figura 13- Contribuição percentual de cada radionuclídeo para a atividade total do embalado com rejeito imobilizado de Angra I

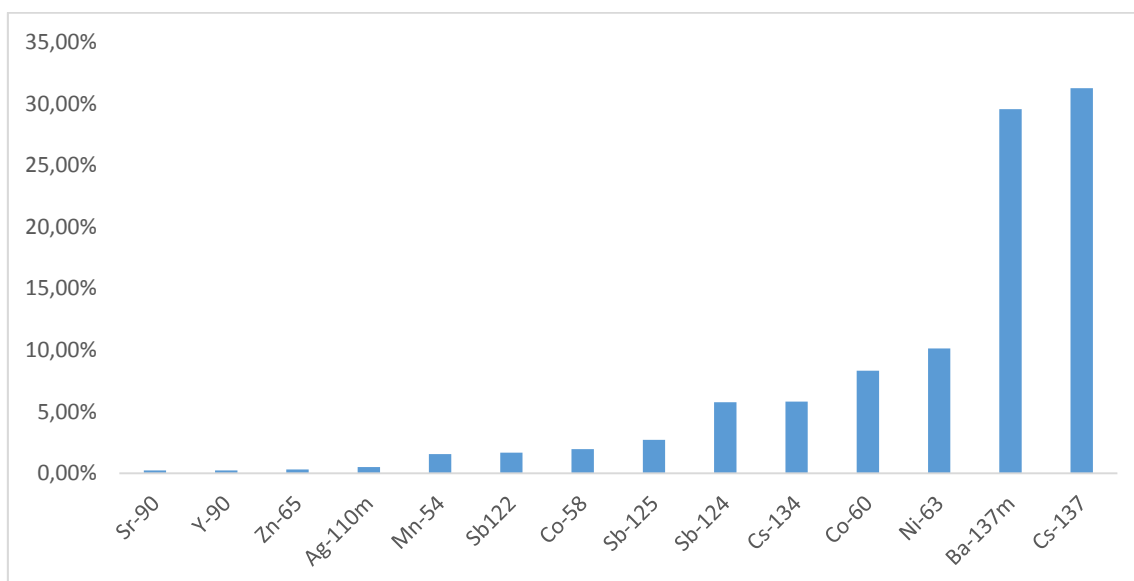


Figura 14- Contribuição percentual de cada radionuclídeo para a atividade total do embalado com rejeito imobilizado de Angra II

4.3 Parâmetros das matrizes sólidas e do rejeito compactado

Na Tabela 6 [4], são apresentados os valores da porosidade efetiva, θ_w , da massa específica, ρ , da condutividade hidráulica, K , e da velocidade de Darcy, V_{darcy} , para o rejeito compactado de Angra 2 e para as matrizes sólidas das resinas exauridas dos primários de Angra 1 (argamassa de cimento) e 2 (betume).

Tabela 6- Parâmetros das matrizes sólidas

Embalado	θ_w	ρ (kg/m ³)	K (m/s)	V_{darcy} (m/h) ^a
Compactado	0,25	605	$5,99 \cdot 10^{-6}$	$3,02 \cdot 10^{-3}$
Argamassa de cimento	0,15	1610,58	10^{-9}	$8,36 \cdot 10^{-6}$
Betume	0,10	1100,0	10^{-10}	$1,25 \cdot 10^{-7}$

a Eq.(9)

4.4 Propriedades químicas dos embalados

Nesta seção serão apresentados os dados referentes às propriedades químicas dos embalados.

4.4.1 Fatores de Bioacumulação e Coeficiente de Distribuição

Na Tabela 7 encontram-se os valores dos Coeficientes de Distribuição, K_d , e fatores de Bioacumulação, B_p , onde se pode destacar que os valores dos fatores de bioacumulação para crustáceos são, para 13 dos 19 elementos analisados, muito maiores do que os dos fatores de bioacumulação para peixes.

Tabela 7- Propriedades químicas dos radionuclídeos presentes nos embalados

Radionuclídeo	Coeficiente de distribuição ^a K_d (m ³ /Kg)	Fator de Bioacumulação ^b B_p (Bq.kg ⁻¹ /Bq.L ⁻¹)	
		Peixes marinhos	Crustáceos
Ag	3,8.10 ⁻¹	500	10 000
Ba	4,0.10 ⁻⁴	10	1
Ce	1,2	50	5 000
Co	4,8.10 ⁻¹	1 000	5 000
Cs	1,2.10 ⁻¹	100	30
Fe	8,8.10 ⁻¹	3 000	30 000
I	6,9.10 ⁻³	10	10
La	5,3	20*	1 000*
Mn	1,2	400	5 000
Mo	4,0.10 ⁻²	10	100
Nb	1,5	30	1 000
Ni	2,8.10 ⁻¹	1 000	2 000
Pr	4,7.10 ^{-2*}	20*	1 000*
Sb	5,0.10 ⁻²	400	400
Sr	5,2.10 ⁻²	2	2
Te	4,8.10 ⁻¹	1 000	1 000
Y	4,7.10 ⁻²	20	1 000
Zn	9,5.10 ⁻¹	1 000	50 000
Zr	4,1.10 ⁻¹	20	5 000

^a Coeficientes de distribuição para todos os solos. Ref. [17]

^b Ref. [5]

* Valores não encontrados na literatura. Foram utilizados valores do ítrio

4.4.2 Tambor com Rejeito compactado de Angra II

Para o caso do rejeito compactado de Angra II, como explanado em 3.3.6, considera-se que os valores de k_d de todos os radionuclídeos são iguais a 0 e, conseqüentemente, os valores de R_d são iguais a 1 para todos eles [vide Eq. (10)]. Substituindo-se $k_d = 0$ (hipótese 5) na Eq. (11), obtém-se a seguinte expressão para a taxa de lixiviação, ALF (independe do elemento químico considerado):

$$ALF = \frac{V_{Darcy}}{(H \cdot \theta_w)} = 1,3 \cdot 10^{-2} \text{ h}^{-1} \quad (25)$$

4.4.3 Coeficientes de Retardo e Taxa de lixiviação para o rejeito imobilizado de Angra I

Na Tabela 8 [Eq.(10),(11)] são apresentados os valores dos coeficientes de retardo e das taxas de lixiviação dos elementos químicos que compõem o rejeito imobilizado de Angra 1 (RP1).

Tabela 8- Coeficientes de retardo dos elementos químicos presentes no embalado com rejeito do tipo RP1

Elemento Químico	R _d	ALF (h ⁻¹)
Mn	12885,64	4,95.10 ⁻¹⁰
Fe	9449,736	6,75.10 ⁻¹⁰
Co	5154,856	1,24.10 ⁻⁹
Sr	559,3344	1,14.10 ⁻⁸
Y	505,6484	1,26.10 ⁻⁸
Zr	44023,52	1,45.10 ⁻¹⁰
Nb	16106,8	3,96.10 ⁻¹⁰
Mo	430,488	1,48.10 ⁻⁸
Te	5154,856	1,24.10 ⁻⁹
I	75,08668	8,50.10 ⁻⁸
Cs	1289,464	4,95.10 ⁻⁹
Ba	5,29488	1,21.10 ⁻⁶
La	56908,16	1,12.10 ⁻¹⁰
Ce	12885,64	4,95.10 ⁻¹⁰
Pr	505,6484	1,26.10 ⁻⁸

4.4.4 Coeficientes de Retardo e Taxa de lixiviação para o rejeito imobilizado de Angra II

Na Tabela 9 [Eq.(10),(11)] são apresentados os valores dos coeficientes de retardo e das taxas de lixiviação dos elementos químicos que compõem o rejeito imobilizado de Angra 2 (RP2).

Tabela 9-Coefficientes de retardo dos elementos químicos presentes no embalado com rejeito do tipo RP2.

Elemento Químico	R _d	ALF (h ⁻¹)
Mn	13201	1,03.10 ⁻¹⁰
Co	5281	2,56.10 ⁻¹⁰
Ni	3081	4,39.10 ⁻¹⁰
Zn	10451	1,30.10 ⁻¹⁰
Sr	573	2,36.10 ⁻⁹
Y	518	2,61.10 ⁻⁹
Ag	4181	3,24.10 ⁻¹⁰
Sb	551	2,46.10 ⁻⁹
Cs	1321	1,02.10 ⁻⁹
Ba	5,4	2,51.10 ⁻⁷

4.5 Fatores de Uso e coeficiente de dose por ingestão

Nesta seção são introduzidos os fatores de uso para peixes e crustáceos (vide Tabela 10) que são os alimentos marinhos mais importantes encontrados nas proximidades do sítio da CNAAA. Os coeficientes de dose por ingestão para os radionuclídeos presentes nos embalados usando as 6 faixas etárias como em [6], encontram-se no Apêndice I. Observa-se que, com exceção do fator de uso para peixes na faixa etária de 7 a 12 anos, o fator de uso aumenta com a idade tanto para peixes quanto para crustáceos. Note-se também que a sexta faixa etária (>17) representa a maior parte da população que é afetada pelo referido acidente.

Tabela 10-Fatores de uso para peixes e crustáceos para 6 diferentes faixas etárias

Consumo ^a	Faixa Etária					
	0a < l ≤ 1a	1a < l ≤ 2a	2a < l ≤ 7a	7a < l ≤ 12a	12a < l ≤ 17a	l > 17
Peixes (kg/ano)	11,4	11,4	11,4	8,91	13	20,5
Crustáceos (kg/ano)	1,02	1,02	1,02	1,82	1,86	3,24

^a Ref[18]

l = idade do indivíduo; a = anos

5 Resultados

5.1 Atividade liberada no canal

Na Tabela 11 são apresentados os valores das atividades liberadas no canal e o percentual da atividade total liberada do embalado, após um período de tempo igual a 1 ano, para os rejeitos do tipo RC2, RP1 e RP2, cujos valores são iguais a 99,40%, $1,7 \times 10^{-3}\%$ e $4,6 \times 10^{-4}\%$, respectivamente. Os cálculos foram realizados com programas de computador (rotinas computacionais) desenvolvidos no Mathematica 10.0. Foi desenvolvido um rotinas para cada tipo de embalado. Estes programas são apresentados nos apêndices II-IV.

Tabela 11-Atividades liberadas no canal e parcela da atividade dissociada da matriz para os 3 tipos de embalados.

	Atividade liberada no canal [Bq]	Parcela da atividade total liberada do embalado [%]
RC2	$5,53 \cdot 10^9$	99,4%
RP1	$3,42 \cdot 10^7$	$1,7 \cdot 10^{-3}\%$
RP2	$9,24 \cdot 10^5$	$4,6 \cdot 10^{-4}\%$

Observa-se, com o auxílio da Tabela 11, que as atividades liberadas pelas matrizes com rejeito imobilizado (RP1 e RP2), iguais a $1,7 \times 10^{-3}\%$ e $4,6 \times 10^{-4}\%$, respectivamente, são ínfimas quando comparadas com as liberadas pelo rejeito compactado (RC2), igual a 99,40%. Assim, pode-se concluir que a imobilização de rejeitos de baixo e médio níveis de radiação, em matriz de betume ou argamassa de cimento, é um método muito mais eficaz, para evitar a liberação desse material no meio ambiente, do que a simples compactação do rejeito.

Em [19] é previsto que as matrizes de betume sejam mais resistentes à lixiviação do que as matrizes de argamassa de cimento. Este fato é aqui confirmado (vide Tabela 11), comparando-se as parcelas das atividades totais liberadas pelos tambores com RP1 ($1,7 \times 10^{-3}\%$) e RP2 ($4,6 \times 10^{-4}\%$).

Já no caso do rejeito compactado de Angra II, ainda com o auxílio da Tabela 11, observa-se que praticamente toda a atividade (99,40%), contida originalmente no embalado, é liberada no canal ao final de um ano. Assim, fica evidente que a velocidade de liberação de atividade de um embalado RC2, para a água do canal, é muito maior que a velocidade de liberação dos embalados com rejeitos RP1 e RP2.

Conseqüentemente, a urgência na aplicação dos métodos de mitigação do acidente deve ser analisada com base na queda de um embalado com rejeito RC2 no referido canal de águas pluviais.

A análise é realizada traçando-se o gráfico da Eq. (18), onde é mostrado o percentual da atividade liberada com o tempo, para cada radionuclídeo (vide Fig. 15).

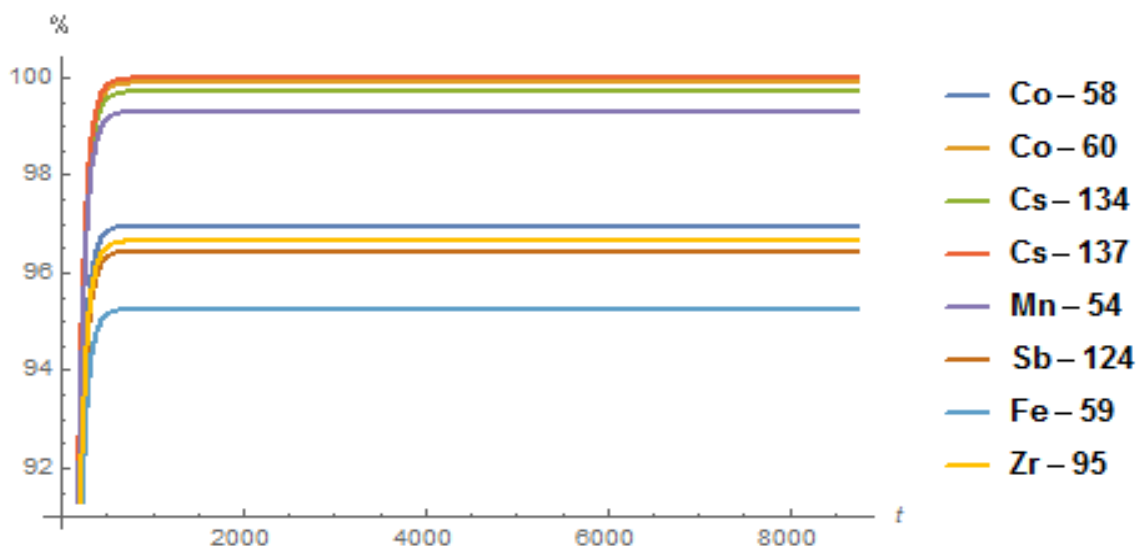


Figura 15 - Percentual da Atividade inicial de cada radionuclídeo liberada no canal (eixo vertical) contra o tempo em horas (eixo horizontal)

A Fig. 15 indica que, para o rejeito do tipo RC2, toda a atividade que a matriz não retém, é liberada no canal nas primeiras 500h do acidente, ou seja, em apenas 21 dias. Portanto, pode-se concluir que os métodos de mitigação do acidente serão mais eficientes se implantados nas primeiras horas ou poucos dias após o início do mesmo. A consequência da não retirada do embalado do canal nesse período é estimada ao se calcular a dose em indivíduo do público para esse caso.

5.2 Lixiviação dos Radionuclídeos

Os radionuclídeos envolvidos no acidente possuem diferentes coeficientes de retardado e atividades e, por isso, contribuem com magnitudes diferentes para a atividade lixiviada. Nas Figs. 16-18, são mostradas as contribuições desses radionuclídeos para a atividade lixiviada em cada caso, onde se pode destacar a importância do Cs-137, pois ao contribuir com mais de 50% da atividade total lixiviada dos embalados com rejeitos imobilizados em matriz sólida (RP1 e RP2), e com mais de 20% da atividade lixiviada do embalado com rejeito compactado (RC2), sua grande capacidade de se dissociar dos embalados e de causar impactos radiológicos tanto em indivíduos do público quanto ao meio ambiente, fica evidente. Tal resultado já era previsto em [20].

O Co-60 é o radionuclídeo que mais contribui para a atividade lixiviada do tambor com RC2. Este comportamento pode ser explicado pelo fato dele ser o radionuclídeo com a maior atividade inicial no embalado, $A_{i,0}$, e possuir um valor do coeficiente de retardo, R_d , igual ao dos demais radionuclídeos presentes no cálculo do processo de lavagem (vide seção 4.4.2).

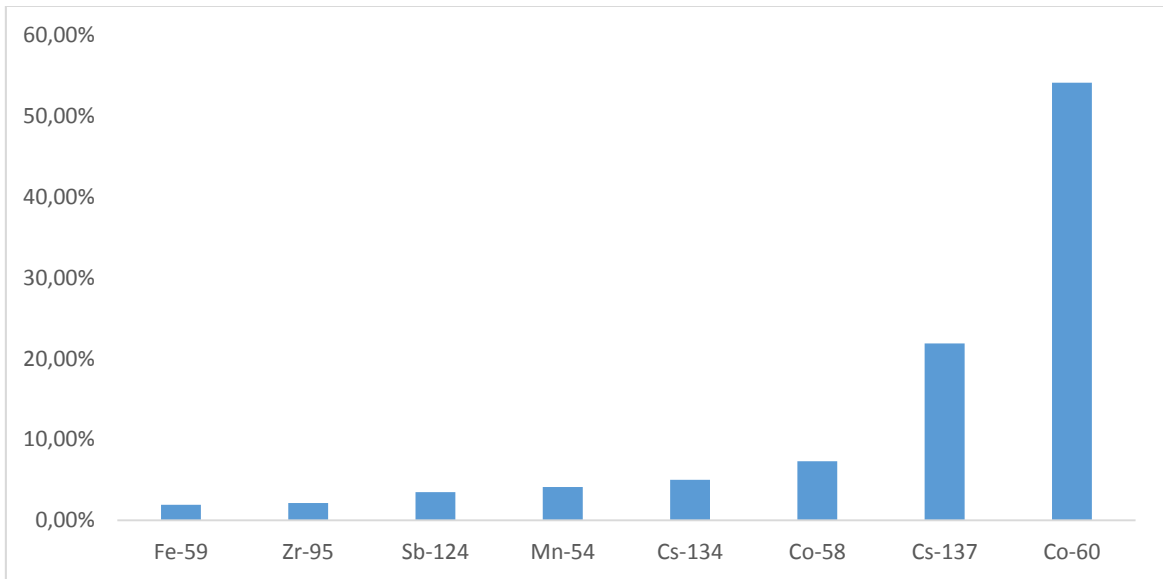


Figura 16- Contribuição percentual de cada radionuclídeo para o total lixiviado no caso RC2

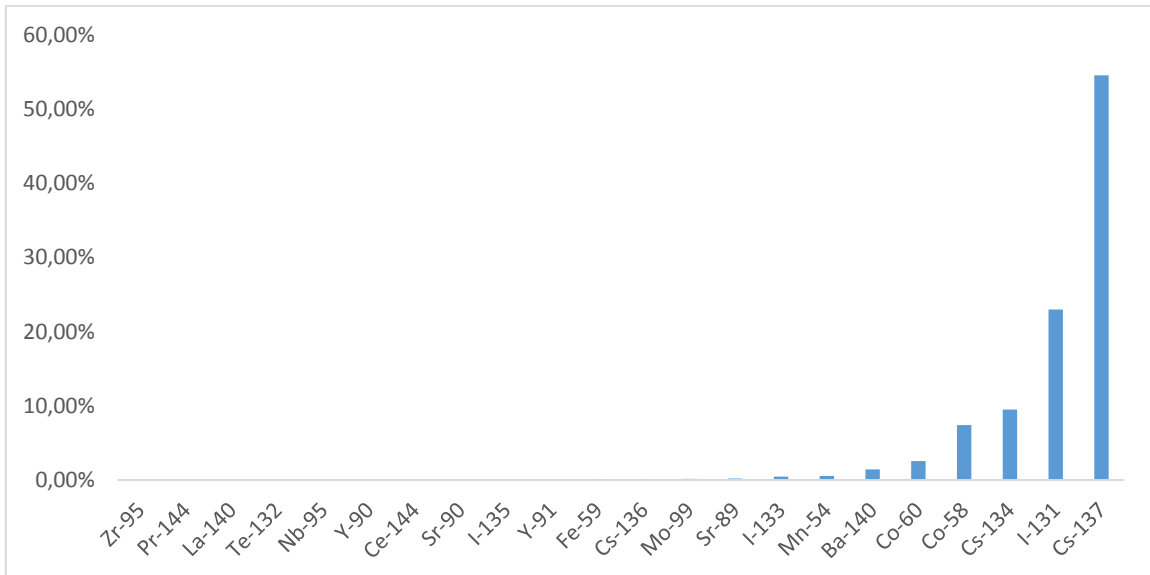


Figura 17-Contribuição percentual de cada radionuclídeo para o total lixiviado no caso RP1

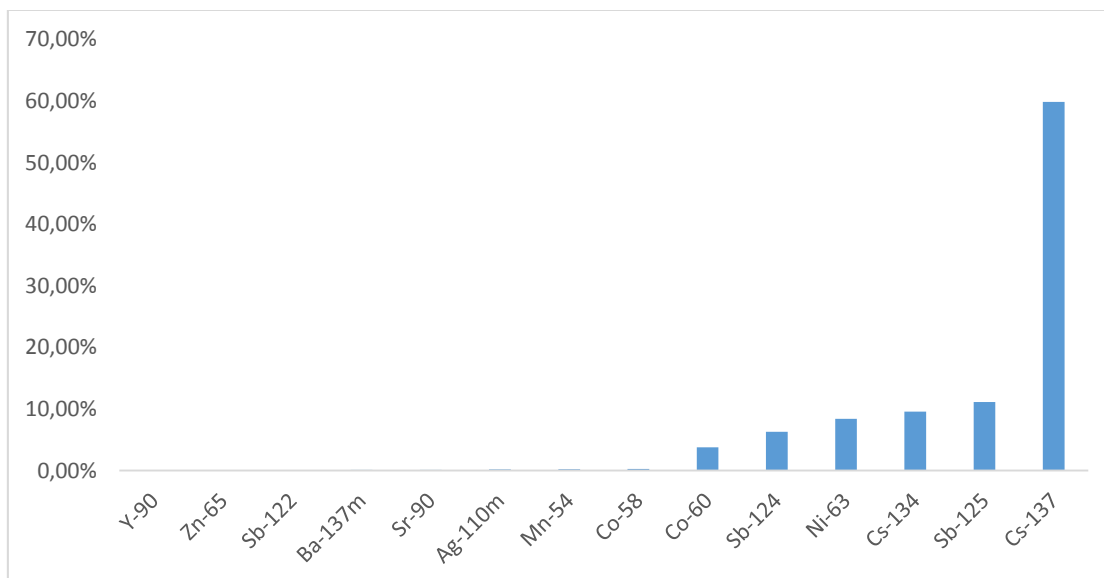


Figura 18- Contribuição percentual de cada radionuclídeo para o total lixiviado caso RP2

5.3 Cálculo da Dose

Os cálculos de dose em indivíduos do público, devido à ingestão de peixes e crustáceos contaminados, foram realizados utilizando-se programas de computador (códigos computacionais) desenvolvidos no Mathematica 10.0. Para esses cálculos, foram consideradas as quedas, não simultâneas no canal, de embalados contendo rejeitos do tipo RC2, RP1 e RP2. Considerou-se, em cada caso, um tempo de duração do acidente igual a 1 ano (tempo de permanência do embalado no interior do canal de águas pluviais da CNAAA). Na Tabela 12 são apresentados os valores de dose para a ingestão de alimentos marinhos contaminados, no período de um ano, para os rejeitos do tipo RC2, RP1 e RP2, e para as 6 faixas etárias consideradas nos cálculos.

Tabela 12- Dose devido à ingestão de alimentos marinhos contaminados, no período de um ano, para cada tipo de embalado e faixa etária

Embalado	Dose [Sv/a]					
	0a < I ≤ 1a	1a < I ≤ 2a	2a < I ≤ 7a	7a < I ≤ 12a	12a < I ≤ 17a	I > 17
RC2 (Sv)	9,5.10 ⁻⁶	4,7.10 ⁻⁶	2,9.10 ⁻⁶	2,1.10 ⁻⁶	1,9.10 ⁻⁶	1,5.10 ⁻⁶
RP1 (Sv)	5,98.10 ⁻⁹	3,47.10 ⁻⁹	2,29.10 ⁻⁹	1,66.10 ⁻⁹	2,14.10 ⁻⁹	2,79.10 ⁻⁹
RP2(Sv)	2,08.10 ⁻¹⁰	1,12.10 ⁻¹⁰	7,30.10 ⁻¹¹	5,30.10 ⁻¹¹	6,70.10 ⁻¹¹	8,70.10 ⁻¹¹

I = idade do indivíduo do público; a = anos.

A dose no indivíduo do público foi calculada para 6 faixas etárias e o maior valor encontrado é igual a 9,5x10⁻⁶ Sv (vide Tabela 12), para o grupo etário com idade menor ou igual a 1 ano, e se refere à queda de embalado com rejeito compactado de Angra II (RC2). Este valor representa apenas 9,5x10⁻³% do limite de dose anual, estipulado pela CNEN para situações de emergência, igual a 10⁻¹ Sv [6].

O impacto radiológico devido ao acidente é ainda muito pequeno quando comparado com o limite operacional de dose igual a 0,25 mSv/a, que é adotado pela Eletronuclear para a liberação de efluentes de cada usina nuclear (Angra 1, 2 e 3) no sítio da

CNAAA, em condições normais de operação. Neste caso, a dose devido ao acidente, igual a $9,5 \times 10^{-9}$ Sv, representa apenas 3,8% desse limite operacional de dose.

É importante observar que o limite de dose anual para um indivíduo do público em condições normais de operação, é fixado em 1 mSv na norma CNEN-NN-3.01[6]. Para atender a esta norma de forma conservadora, a Eletronuclear adota um limite de dose anual igual a 0,25 mSv para a operação normal de cada uma das usinas (Angra 1, 2 e 3), perfazendo um total de dose anual igual a 0,75 mSv.

A participação na dose ingerida devido à ingestão de peixes e crustáceos contaminados para cada faixa etária também foi analisada, como pode ser visto nas Figs 19-21, onde é vista a parcela de contribuição de cada tipo de alimento marinho para a dose em cada grupo. No geral, a maior parte da dose de ingestão é proveniente do consumo de peixes, o que pode ser explicado por um fator de consumo anual de peixes maior do que de crustáceos, apesar do fator de bioacumulação para crustáceos ser em média superior ao mesmo fator para peixes [5]. Entretanto, o consumo de crustáceos não pode ser desprezado no cálculo da dose, sendo em alguns casos, por exemplo para o RC2, correspondente a mais de 40% da dose total de ingestão por grupo etário. Nos embalados do tipo RP1 e RP2, a contribuição do consumo de crustáceos para a dose é claramente menor do que no embalado do tipo RC2, o que se atribui ao fato dos radionuclídeos presentes no RC2 possuírem fatores de bioacumulação para crustáceos maiores do que para peixes em comparação com os radionuclídeos presentes nos embalados RP1 e RP2.

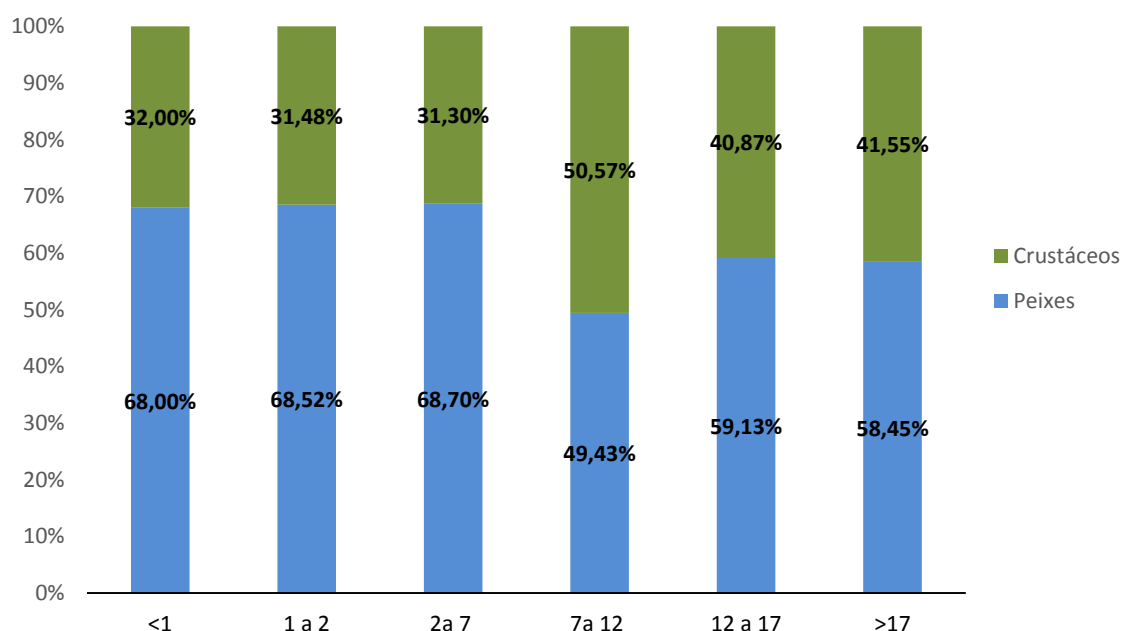


Figura 19- Contribuição percentual da dose gerada pela ingestão de peixes e crustáceos na dose total por faixa etária para o caso do RC2

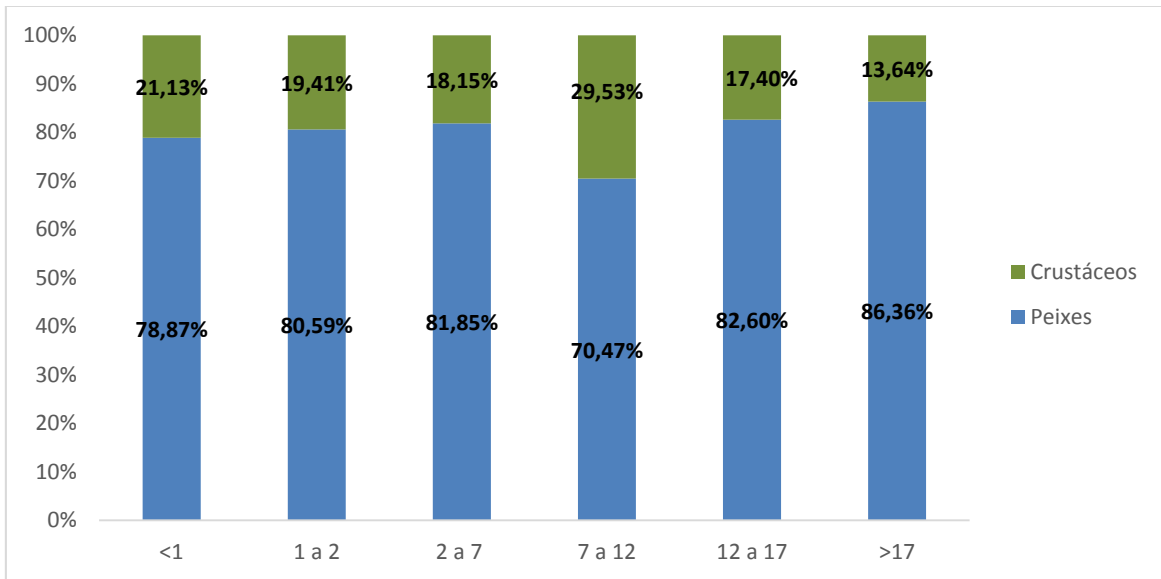


Figura 20– Contribuição percentual da dose gerada pela ingestão de peixes e crustáceos na dose total por faixa etária para o caso do RP1

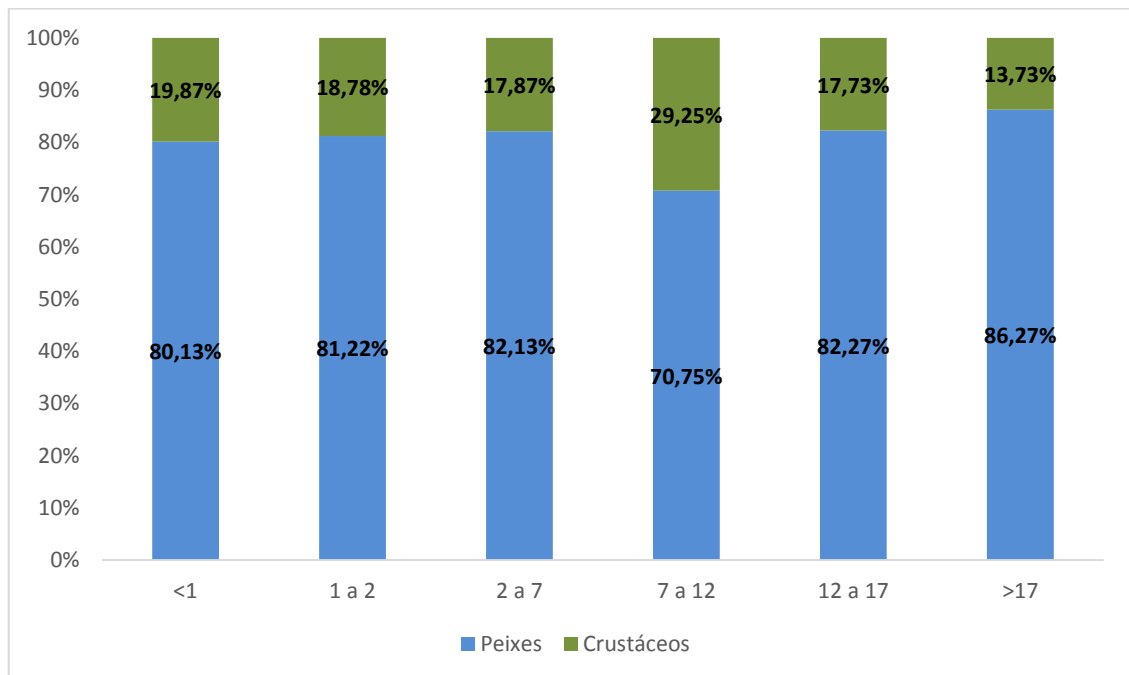


Figura 21– Contribuição percentual da dose gerada pela ingestão de peixes e crustáceos na dose total por faixa etária para o caso do RP2

Na seção 5.2 foi mostrado que o Co-60 é o radionuclídeo mais importante para os rejeitos do tipo RC2, enquanto o Cs-137 é o mais representativo para os rejeitos dos tipos RP1 e RP2.

Levando-se em consideração que os maiores valores de dose provocados pelo acidente, em indivíduos do público, ocorrem devido à queda de embalado com rejeito do tipo RC2 no canal, conclui-se que o Co-60 é o radionuclídeo mais relevante para o cenário de acidente aqui analisado.

6 Conclusão

Conforme mencionado anteriormente, um dos critérios de aceitação para a deposição final do rejeito radioativo em um repositório é a sua caracterização isotópica, que compreende a determinação dos radionuclídeos constituintes do mesmo, bem como suas respectivas atividades alfa, beta e gama.

Para atender a esta demanda, a Eletronuclear projetou o Prédio de Monitoração (PM) que se encontra, atualmente, em fase final de construção, no interior das dependências do Centro de Gerenciamento de Rejeitos (CGR) da CNAAA.

Para o licenciamento dessa nova instalação (PM) e para a regularização do CGR junto à CNEN, foi elaborado o Relatório Final de Análise de Segurança (RFAS) de todo o empreendimento, considerando-se não somente o Prédio de Monitoração, mas também, os depósitos 1, 2 e 3 contidos no CGR.

Na elaboração desse relatório, foram postulados vários cenários de acidentes, onde se destaca, por sua peculiaridade, a queda de embalado com rejeito de baixo e médio nível de radiação, no canal de águas pluviais (canal nº 5) da CNAAA.

Neste cenário, considera-se que após a queda do embalado no canal, o seu conteúdo radioativo será lixiviado pela água do mesmo e depois arrastado até o mar pelo mecanismo de dispersão em águas superficiais, podendo contaminar peixes e crustáceos.

Utilizando-se modelos analíticos, determinam-se a lixiviação do material radioativo para a água do canal, a sua dispersão ao longo deste até atingir o mar e a dose no indivíduo do público, para a ingestão dos referidos alimentos marinhos contaminados.

Devido à falta de informação precisa sobre os parâmetros dos modelos, considerou-se que os valores de porosidade efetiva, densidade e condutividade hidráulica do rejeito compactado de Angra II são iguais aos da areia grossa. Valores mais realísticos, para esses parâmetros, podem ser obtidos no futuro, com um trabalho de caracterização do rejeito após sua trituração e compactação no embalado.

Os resultados da atividade liberada, dos embalados com rejeito imobilizado em matriz sólida (cimento e betume), mostraram a eficácia dessa solução como barreira à liberação dos rejeitos. Observa-se, com o auxílio da Tabela 11, que o betume é o material mais indicado para reter os radionuclídeos presentes nos rejeitos de médio e baixo nível de radiação de Angra 1 e 2. Ele é 3,7 vezes mais eficiente do que a pasta de cimento e $2,1 \times 10^3$ vezes melhor que o rejeito compactado. A pasta de cimento, por sua vez, retém mais radionuclídeos do que o rejeito compactado na proporção de $5,8 \times 10^2$ para 1.

O elemento químico que apresentou a maior capacidade de se dissociar das matrizes sólidas foi o Cs-137, contribuindo determinantemente para a atividade lixiviada em cada tipo de matriz sólida. Já para o caso dos rejeitos compactados, observa-se que o radionuclídeo mais importante é o Co-60.

Levando-se em consideração que os maiores valores de dose provocados pelo acidente, em indivíduos do público, ocorrem devido à queda de embalado com rejeito do tipo RC2 no canal, conclui-se que o Co-60 é o radionuclídeo mais relevante para o cenário de acidente aqui analisado.

O maior valor de dose encontrado no acidente é igual a $9,5 \times 10^{-9}$ Sv e se refere à queda de um embalado com rejeito compactado de Angra 2 (RC2) no canal, e para indivíduos do público com idade menor ou igual a 1 ano.

Verifica-se que este valor de dose é muito inferior aos limites de dose anual, considerados como limites reguladores, na presente análise de segurança. Esses

limites são iguais a 10^{-1} Sv/a para situações de emergência [6] e a 0,25 mSv/a para a operação normal de cada uma das usinas da CNAAA.

Assim, observa-se que o maior valor de dose encontrado devido ao acidente ($9,5 \times 10^{-6}$ Sv) representa apenas $9,5 \times 10^{-3}$ % do limite para situações de emergência e 3,8% do limite operacional de dose para cada usina.

Os resultados obtidos com esses modelos mostram que os valores de dose, obtidos para os indivíduos do público, são muito inferiores aos limites reguladores considerados. Portanto, conclui-se que o cenário de acidente de queda de embalado radioativo, no interior do canal de águas pluviais (canal nº 5) da CNAAA, está em conformidade com os limites reguladores considerados.

Em possíveis futuros trabalhos sobre o tema, é recomendada a obtenção de valores mais acurados para o coeficiente de distribuição e porosidade efetiva do embalado. Tais parâmetros possuem grande variação dependendo do material contido no interior do embalado e podem ter uma grande influência no cálculo da velocidade e na quantidade de atividade que é dissociada da matriz de rejeito.

Referências

- [1] – ELETRONUCLEAR, Prédio de Monitoração do Centro de Gerenciamento de Rejeitos - Memorial Descritivo / Bases de Projeto / Caracterização Ambiental, BP/03001, Rev.1, Rio de Janeiro, Brasil, 2010.
- [2] – DE TELO, C. C. O., RBMN Project – Repository for low and intermediate level waste, CDTN/CNEN, Belo Horizonte, Brazil, 2009. Disponível em <http://www.aben.com.br/Arquivos/189/189.pdf>. Acesso em 30. Oct. 2016.
- [3] – CNEN – Norma CNEN-NN-8.01, Gerência de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação, Rio de Janeiro, Brasil, 2014.
- [4] – ELETRONUCLEAR, Relatório Final de Análise de Segurança do Centro de Gerenciamento de Rejeitos da CNAEA, Rio de Janeiro, Brasil, 2016.
- [5] – IAEA - Safety Report Series No.19, Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment, Vienna, Austria, 2001.
- [6] – CNEN – Posição Regulatória CNEN-NN-3.01, Diretrizes Básicas de Radioproteção, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.
- [7] – ELETRONUCLEAR, Estudo de Impacto Ambiental – EIA – Unidade III do DIRR/CNAEA, Rio de Janeiro, Brasil, 2003.
- [8] - TOMAZ, P., Curso de Manejo de Águas Pluviais - Capítulo 50 - Fórmula de Manning e Canais. Disponível em www.pliniotomaz.com.br. Acesso em 30. Oct. 2016.
- [9] - TILL, J. E. & GROGAN, H. A., Radiological Risk Assessment and Environmental Analysis, Oxford University Press, Oxford, UK, 2008.
- [10] – IAEA - Safety Guide 50-SG-S6, Hydrological Dispersion of Radioactive Material in Relation to Nuclear Power Plant Siting, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 1985.
- [11] – IAEA, Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities, Volume 1, Vienna, Austria, 2004.
- [12] – ALCÂNTARA, M. A. K. & CAMARGO, O. A., Fator de Retardamento e Coeficiente de Dispersão-Difusão para o Crômio (iii) em Solos muito Intemperizados, Influenciados pelo pH, Textura e Matéria Orgânica, Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 25, nº 1, pp. 209 – 216, 2001.
- [13] - PASSOS, E. M. & ALVES, A. S., Análise Radiológica para Escolha de Embalagens para Rejeitos Radioativos Sólidos de Média e Baixa Atividades de Angra 2, Relatório Técnico Eletronuclear nº GSN.T – 017/05, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.
- [14] – ICRP - Annals of the ICRP, Radionuclide Transformations. Energy and Intensity of Emissions, Vienna, Austria 1983.
- [15] – ELETRONUCLEAR, Final Safety Analysis Report – Angra 1 NPP, ver. 35, Rio de Janeiro, Brazil, 2005.
- [16] - ALVES, A. S., Resina Exaurida - Análise Radiológica para a Resina Exaurida de Angra 2, Relatório Técnico Eletronuclear nº BN/2/0068/1170/08040, Rio de Janeiro, Brasil, 2008.
- [17] – IAEA - Technical Reports Series No. 472, Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments, Vienna, Austria, 2010.

- [18] - DIAS, W. B., Angra 2: Manual de Controle Radiológico do Meio Ambiente – MCRMA. Relatório Técnico Eletronuclear nº CP/2/1170/000001, Rio de Janeiro, Brasil 2002.
- [19] - OJAVAN, M. I. & LEE, W. E., An Introduction to Nuclear Waste Immobilization, Elsevier, Oxford, UK, 2005.
- [20] – IAEA - Technical Reports Series No. 350, Improved Cement Solidification of Low and Intermediate Level Radioactive Wastes, Vienna, Austria, 1993.

Apêndice I

**Coeficiente de Dose por ingestão
para os radionuclídeos envolvidos
no acidente e para as 6 faixas
etárias analisadas.**

Radionuclídeo	DF _{ing} (Sv/Bq)					
	Idade (anos)					
	<1	1 a 2	2 a 7	7 a 12	12 a 17	> 17
⁵⁴ Mn	5,4E.10 ⁻⁹	3,1.10 ⁻⁹	1,9E.10 ⁻⁹	1,3.10 ⁻⁹	8,7E.10 ⁻¹⁰	7,1.10 ⁻¹⁰
⁵⁹ Fe	3,9.10 ⁻⁸	1,3.10 ⁻⁸	7,5.10 ⁻⁹	4,7.10 ⁻⁹	3,1.10 ⁻⁹	1,8.10 ⁻⁹
⁵⁸ Co	7,3.10 ⁻⁹	4,4.10 ⁻⁹	2,6.10 ⁻⁹	1,7.10 ⁻⁹	1,1.10 ⁻⁹	7,4.10 ⁻¹⁰
⁶⁰ Co	5,4.10 ⁻⁸	2,7.10 ⁻⁸	1,7.10 ⁻⁸	1,1.10 ⁻⁸	7,9.10 ⁻⁹	3,4.10 ⁻⁹
⁶³ Ni	1,6.10 ⁻⁹	8,4.10 ⁻¹⁰	4,6.10 ⁻¹⁰	2,8.10 ⁻¹⁰	1,8.10 ⁻¹⁰	1,5.10 ⁻¹⁰
⁶⁵ Zn	3,6.10 ⁻⁸	1,6.10 ⁻⁸	9,7.10 ⁻⁹	6,4.10 ⁻⁹	4,5.10 ⁻⁹	3,9.10 ⁻⁹
⁸⁹ Sr	3,6.10 ⁻⁸	1,8.10 ⁻⁸	8,9.10 ⁻⁹	5,8.10 ⁻⁹	4,0.10 ⁻⁹	2,6.10 ⁻⁹
⁹⁰ Sr	2,3.10 ⁻⁷	7,3.10 ⁻⁸	4,7.10 ⁻⁸	6,0.10 ⁻⁸	8,0.10 ⁻⁸	2,8.10 ⁻⁸
⁹⁰ Y	3,1.10 ⁻⁸	2,0.10 ⁻⁸	1,0.10 ⁻⁸	5,9.10 ⁻⁹	3,3.10 ⁻⁹	2,7.10 ⁻⁹
⁹¹ Y	2,8.10 ⁻⁸	1,8.10 ⁻⁸	8,8.10 ⁻⁹	5,2.10 ⁻⁹	2,9.10 ⁻⁹	2,4.10 ⁻⁹
⁹⁵ Zr	8,5.10 ⁻⁹	5,6.10 ⁻⁹	3,0.10 ⁻⁹	1,9.10 ⁻⁹	1,2.10 ⁻⁹	9,5.10 ⁻¹⁰
⁹⁵ Nb	4,6.10 ⁻⁹	3,2.10 ⁻⁹	1,8.10 ⁻⁹	1,1.10 ⁻⁹	7,4.10 ⁻¹⁰	5,8.10 ⁻¹⁰
⁹⁹ Mo	5,5.10 ⁻⁹	3,5.10 ⁻⁹	1,8.10 ⁻⁹	1,1.10 ⁻⁹	7,6.10 ⁻¹⁰	6,0.10 ⁻¹⁰
^{110m} Ag	2,4.10 ⁻⁸	1,4.10 ⁻⁸	7,8.10 ⁻⁹	5,2.10 ⁻⁹	3,4.10 ⁻⁹	2,8.10 ⁻⁹
¹²² Sb	1,8.10 ⁻⁸	1,2.10 ⁻⁸	6,1.10 ⁻⁹	3,7.10 ⁻⁹	2,1.10 ⁻⁹	1,7.10 ⁻⁹
¹²⁴ Sb	2,5.10 ⁻⁸	1,6.10 ⁻⁸	8,4.10 ⁻⁹	5,2.10 ⁻⁹	3,2.10 ⁻⁹	2,5.10 ⁻⁹
¹²⁵ Sb	1,1.10 ⁻⁸	6,1.10 ⁻⁹	3,4.10 ⁻⁹	2,1.10 ⁻⁹	1,4.10 ⁻⁹	1,1.10 ⁻⁹
¹³² Te	4,8.10 ⁻⁸	3,0.10 ⁻⁸	1,6.10 ⁻⁸	8,3.10 ⁻⁹	5,3.10 ⁻⁹	3,8.10 ⁻⁹
¹³¹ I	1,8.10 ⁻⁷	1,8.10 ⁻⁷	1,0.10 ⁻⁷	5,2.10 ⁻⁸	3,4.10 ⁻⁸	2,2.10 ⁻⁸
¹³³ I	4,9.10 ⁻⁸	4,4.10 ⁻⁸	2,3.10 ⁻⁸	1,0.10 ⁻⁸	6,8.10 ⁻⁹	4,3.10 ⁻⁹
¹³⁵ I	1,0.10 ⁻⁸	8,9.10 ⁻⁹	4,7.10 ⁻⁹	2,2.10 ⁻⁹	1,4.10 ⁻⁹	9,3.10 ⁻¹⁰
¹³⁴ Cs	2,6.10 ⁻⁸	1,6.10 ⁻⁸	1,3.10 ⁻⁸	1,4.10 ⁻⁸	1,9.10 ⁻⁸	1,9.10 ⁻⁸
¹³⁶ Cs	1,5.10 ⁻⁸	9,5.10 ⁻⁹	6,1.10 ⁻⁹	4,4.10 ⁻⁹	3,4.10 ⁻⁹	3,0.10 ⁻⁹
¹³⁷ Cs	2,1.10 ⁻⁸	1,2.10 ⁻⁸	9,6.10 ⁻⁹	1,0.10 ⁻⁸	1,3.10 ⁻⁸	1,3.10 ⁻⁸
^{137m} Ba	2,1.10 ⁻⁸	1,2.10 ^{-8*}	9,6.10 ⁻⁹	1,0.10 ^{-8*}	1,3.10 ⁻⁸	1,3.10 ^{-8*}
¹⁴⁰ Ba	3,2.10 ⁻⁸	1,8.10 ⁻⁸	9,2.10 ⁻⁹	5,8.10 ⁻⁹	3,7.10 ⁻⁹	2,6.10 ⁻⁹
¹⁴⁰ La	2,0.10 ⁻⁸	1,3.10 ⁻⁸	6,8.10 ⁻⁹	4,2.10 ⁻⁹	2,5.10 ⁻⁹	2,0.10 ⁻⁹
¹⁴⁴ Ce	6,6.10 ⁻⁸	3,9.10 ⁻⁸	1,9.10 ⁻⁸	1,1.10 ⁻⁸	6,5.10 ⁻⁹	5,2.10 ⁻⁹
¹⁴⁴ Pr	6,4.10 ⁻¹⁰	3,5.10 ⁻¹⁰	1,7.10 ⁻¹⁰	9,5.10 ⁻¹¹	6,5.10 ⁻¹¹	5,0.10 ⁻¹¹

Apêndice II

Programa para o cálculo da Dose do RC2

```

"Dados do Problema"
x=720
θ=0.25
n=0.013
b=6
y=0.56
H=0.928
A=b*y
R=b*y/(b+2*y)
i=0.0349
tf=24*365
"U e qr em m/h e m³/h respectivamente"
U=(1/n)*(R^(2/3))*(i^(0.5))*3600
qr=U*A
"CONDutividade Hidraulica em m/h"
K=189.2/(24*365)
"INF e ALF em metros por hora"
INF=K*i/θ
ALF=(INF)/(H*θ)
"CONcentrações dos isotopos (A em Bq, λ em h-1) "
Co58={416310000,(3600)*1.13313*10^(-7)};
Co60={2997000000,(3600)*4.1699*10^(-9)};
Cs134={277500000,(3600)*1.06593*10^(-8)};
Cs137={1210000000,(3600)*7.32652*10^(-10)};
Mn54={229400000,(3600)*2.56721*10^(-8)};
Sb124={199800000,(3600)*1.33265*10^(-7)};
Fe59={111000000,(3600)*1.80164*10^(-7)};
Zr95={122100000,(3600)*1.25391*10^(-7)};
TOTAL= 5563000000;

ISO={Co58,Co60,Cs134,Cs137,Mn54,Sb124,Fe59,Zr95}
RESULTS = {}

j = 1
Conc=E(x*ISO[[j,2]]/U)*(3/qr*ISO[[j,1]]*ALF)*E(-t*(ISO[[j,2]]+ALF))
(*Do[Print(4)

Conc=□(x*ISO[[j,2]]/U)*(3/q*ISO[[j,1]]*(ISO[[j,2]]+ALF)))*□(-t*(ISO[[j,2]]+ALF));
Print(2)
RESULTS = Append(RESULTS,Conc),
{j,9}];*)
"Concentrações na saída do Canal em Bq/h"

Do[Conc=E(-x*ISO[[j,2]]/U)*(3/qr*ISO[[j,1]]*ALF)*E(-t*(ISO[[j,2]]+ALF));
RESULTS = Append[RESULTS,Conc],

```

```

    {j,8}]];
Print[RESULTS]

"Fator de Bioacumulação para Peixes e Crustáceos por
elemento
Ordem Co2x,Cs2x,Mn,Sb,Fe,Zr"
BPP={1000,1000,100,100,400,400,3000,20}
BPC={5000,5000,30,30,5000,400,30000,5000}
"Concentração da Atividade no Alimento marinho"
ConcafP=(RESULTS*BPP)/1000
ConcafC=(RESULTS*BPC)/1000
"Teste cm 6 faixas etárias e DF e H no mesmo valor"
"Para Peixes para cada isotopo"
"<1"
DFISOHP1=(11.4/tf)*{7.3*10^(-9),5.4*10^(-8),2.6*10^(-
8),2.1*10^(-8),5.4*10^-9,2.5*10^-8,3.9*10^-8,8.5*10^(-
9)}
"1 a 2"
DFISOHP2=(11.4/tf)*{4.4*10^(-9),2.7*10^(-8),1.6*10^(-
8),1.2*10^(-8),3.1*10^(-9),
1.6*10^(-8),1.3*10^(-8),5.6*10^(-9)}
"2 a 7"
DFISOHP3=(11.4/tf)*{2.6*10^(-9),1.7*10^(-8),1.3*10^(-
8),9.6*10^(-9),1.9*10^(-9),8.4*10^-9,7.5*10^-
9,3.0*10^(-9)}
"7 a 12"
DFISOHP4=(8.91/tf)*{1.7*10^(-9),1.1*10^(-8),1.4*10^(-
8),1.0*10^(-8),1.3*10^(-9),5.2*10^(-9),4.7*10^(-
9),1.9*10^(-9)}
"12 a 17"
DFISOHP5=(13/tf)*{1.1*10^(-9),7.9*10^-9,1.9*10^(-
8),1.3*10^-8,8.7*10^-10,3.2*10^-9,3.1*10^-9,1.2*10^(-
9)}
">17"
DFISOHP6=(20.5/tf)*{7.4*10^(-10),3.4*10^(-9),1.9*10^(-
8),1.3*10^(-8),7.1*10^(-10),2.5*10^(-9),1.8*10^(-
9),9.5*10^(-10)}
"Para Crustáceos para cada isotopo"
"<1"
DFISOHC1=(1.02/tf)*{7.3*10^(-9),5.4*10^(-8),2.6*10^(-
8),2.1*10^-8,5.4*10^-9,2.5*10^-8,3.9*10^-8,8.5*10^(-
9)}
"1 a 2"
DFISOHC2=(1.02/tf)*{4.4*10^(-9),2.7*10^(-8),1.6*10^(-
8),1.2*10^(-8),3.1*10^(-9),
1.6*10^(-8),1.3*10^(-8),5.6*10^(-9)}
"2 a 7"
DFISOHC3=(1.02/tf)*{2.6*10^(-9),1.7*10^(-8),1.3*10^(-
8),9.6*10^-9,1.9*10^-9,8.4*10^-9,7.5*10^-9,3.0*10^(-
9)}
"7 a 12"

```

```

DFISOHC4=(1.82/tf)*{1.7*10^(-9),1.1*10^(-8),1.4*10^(-8),1.0*10^(-8),1.3*10^(-9),5.2*10^(-9),4.7*10^(-9),1.9*10^(-9)}
"12 a 17"
DFISOHC5=(1.86/tf)*{1.1*10^(-9),7.9*10^(-9),1.9*10^(-8),1.3*10^(-8),8.7*10^(-10),3.2*10^(-9),3.1*10^(-9),1.2*10^(-9)}
">17"
DFISOHC6=(3.24/tf)*{7.4*10^(-10),3.4*10^(-9),1.9*10^(-8),1.3*10^(-8),7.1*10^(-10),2.5*10^(-9),1.8*10^(-9),9.5*10^(-10)}
"Doses Efetivas"

"<1"
DefP1=ConcafP*DFISOHP1
"1 a 2"
DefP2=ConcafP*DFISOHP2
"2 a 7"
DefP3=ConcafP*DFISOHP3
"7 a 12"
DefP4=ConcafP*DFISOHP4
"12 a 17"
DefP5=ConcafP*DFISOHP5
">17"
DefP6=ConcafP*DFISOHP6
"<1"
DefC1=ConcafC*DFISOHC1
"1 a 2"
DefC2=ConcafC*DFISOHC2
"2 a 7"
DefC3=ConcafC*DFISOHC3
"7 a 12"
DefC4=ConcafC*DFISOHC4
"12 a 17"
DefC5=ConcafC*DFISOHC5
">17"
DefC6=ConcafC*DFISOHC6
"somatorio dose"

DoseP={Total[DefP1],Total[DefP2],Total[DefP3],Total[DefP4],Total[DefP5],Total[DefP6]}
DoseC={Total[DefC1],Total[DefC2],Total[DefC3],Total[DefC4],Total[DefC5],Total[DefC6]}
"Doses Efetivas acumuladas em 1 ano Peixes"
Print[ $\int_0^{tf} \text{DoseP}[[1]] dt$ ]
Print[ $\int_0^{tf} \text{DoseP}[[2]] dt$ ]
Print[ $\int_0^{tf} \text{DoseP}[[3]] dt$ ]
Print[ $\int_0^{tf} \text{DoseP}[[4]] dt$ ]

```

```

Print[ $\int_0^{tf}$  DoseP [[5]] dt ]
Print[ $\int_0^{tf}$  DoseP [[6]] dt ]
"Doses Efetivas acumuladas em 1 ano Crustaceos"
Print[ $\int_0^{tf}$  DoseC [[1]] dt ]
Print[ $\int_0^{tf}$  DoseC [[2]] dt ]
Print[ $\int_0^{tf}$  DoseC [[3]] dt ]
Print[ $\int_0^{tf}$  DoseC [[4]] dt ]
Print[ $\int_0^{tf}$  DoseC [[5]] dt ]
Print[ $\int_0^{tf}$  DoseC [[6]] dt ]
"Dose P+C em 1 ano"
Print[ $\int_0^{tf}$  DoseP [[1]] dt +  $\int_0^{tf}$  DoseC [[1]] dt ]
Print[ $\int_0^{tf}$  DoseP [[2]] dt +  $\int_0^{tf}$  DoseC [[2]] dt ]
Print[ $\int_0^{tf}$  DoseP [[3]] dt +  $\int_0^{tf}$  DoseC [[3]] dt ]
Print[ $\int_0^{tf}$  DoseP [[4]] dt +  $\int_0^{tf}$  DoseC [[4]] dt ]
Print[ $\int_0^{tf}$  DoseP [[5]] dt +  $\int_0^{tf}$  DoseC [[5]] dt ]
Print[ $\int_0^{tf}$  DoseP [[6]] dt +  $\int_0^{tf}$  DoseC [[6]] dt ]

"porcentagem lixiviada"
k = 1

Ap= (ALF) / (ISO[[k,2]]+ALF) * (1-E(-t*(ISO[[k,2]]+ALF)))
RESULTSA = {}

Do[Ap= (ALF) / (ISO[[k,2]]+ALF) * (1-E(-t*(ISO[[k,2]]+ALF))) ;
  RESULTSA = Append[RESULTSA,Ap],
  {k,8}];

Print[RESULTSA]
ALibrel=RESULTSA*100
Plot[{ALibrel[[1]],ALibrel[[2]],ALibrel[[3]],ALibrel[[4]],ALibre
l[[5]],ALibrel[[6]],ALibrel[[7]],ALibrel[[8]]},{t,0,tf},AxesLabe
l->{t,"%"},PlotLegends->"Expressions"]

```

Apêndice III

Programa para o cálculo da dose do RP1

```

pa=1610.58
x=720.0
θ=0.15
n=0.013
b=6.0
y=0.57
H=0.875
A=b*y
R=(b*y)/(b+2*y)
i=0.0349
tf=24*365
"U e qr em m/h e m³/h respectivamente"
U=(1/n)*(R^(2/3))*(i^(0.5))*3600
qr=U*A
"Condutividade Hidraulica em m/h"
K=(10*10^(-10))*3600
"INF metros por hora"
INF=(K*i)/θ

```

```

"Ordem no KD
Mn, Fe, Co (x2) , Sr (x2) , Y (x2) , Zr, Nb, Mo, Te, I (x3) , Cs (x3) , Ba,
La, Ce, Pr"
Kdi= (1*10^-
3)*{1.2*10^3, 8.8*10^2, 4.8*10^2, 4.8*10^2, 5.2*10^1, 5.2*1
0^1, 4.7*10^1, 4.7*10^1, 4.1*10^2, 1.5*10^3, 4.0*10^1, 4.8*1
0^2, 6.9*10^0, 6.9*10^0, 6.9*10^0, 1.2*10^2, 1.2*10^2, 1.2*1
0^2, 4.0*10^-1, 5.3*10^3, 1.2*10^3, 47}
"Coeficiente de Retardo por elemento"
Rd=1+(pa*Kdi/θ)
"ALF por elemento"
ALFi=(INF/(H*θ*Rd))

```

"A em Bq e λ em (1/h) "

```

Mn54= {1.628*10^8, 9.24196*10^-05}
Fe59={6.216*10^7, 0.000648592}
Co58= {2.220*10^9, 0.000407926}
Co60= {2.220*10^8, 1.50116*10^(-05)}
Sr89= {8.584*10^6, 0.000571904}
Sr90= {1.332*10^6, 0.000991797}
Y90= {1.302*10^6, 0.010830425}
Y91 ={1.510*10^6, 0.00049361}
Zr95= {1.865*10^6, 0.000451409}
Nb95= {2.782*10^6, 0.000821654}
Mo99={9.176*10^7, 0.01050223}
Te132= {3.848*10^7, 1.663553233}
I131= {8.584*10^8, 0.003592181}
I133= {1.598*10^8, 0.033324384}
I135= {2.960*10^7, 0.104863416}
Cs134= {2.279*10^8, 3.83736*10^(-5)}
Cs136= {2.960*10^6, 0.002204667}
Cs137 ={1.125*10^9, 2.63755*10^(-06)}
Ba140= {2.368*10^6, 0.002266965}
La140= {2.368*10^6, 0.01721164}
Ce144= {2.546*10^6, 0.000116315}
Pr144= {2.546*10^6, 2.406761044}
TOTAL=5.228*10^9

```

```

ISO={Mn54, Fe59, Co58, Co60, Sr89, Sr90, Y90, Y91, Zr95, Nb95, M
o99, Te132, I131, I133, I135, Cs134, Cs136, Cs137, Ba140, La140
, Ce144, Pr144}

```

```

RESULTS={}

```

```

j=1

```

"Concentrações na saída do Canal em Bq/h"

```

Do[Conc =

```

$$\int_0^{tf} e^{(-x*ISO[[j,2]]/U)} * \left(\frac{3}{qr} * ISO[[j, 1]] * ALFi[[j]] \right) * e^{(-t*(ISO[[j,2]]+ALFi[[j]])} dt ;$$

```

RESULTS = Append[RESULTS, Conc] ,

```



```
{j,22}];  
Print[RESULTS]
```

```
"Fator de Bioacumulação para peixes e crustaceos ordem  
Mn, Fe, Co (x2), Sr (x2), Y (x2), Zr, Nb, Mo, Te, I (x3), Cs (x3), Ba,  
La, Ce, Pr"
```

```
BPP={400,3000,1000,1000,2,2,20,20,20,30,10,1000,10,10,  
10,100,100,100,10,20,50,20}
```

```
BPC={5000,30000,5000,5000,2,2,1000,1000,5000,1000,100,  
1000,10,10,10,30,30,30,1,1000,5000,1000}
```

```
"Concentração da Atividade no Alimento marinho"
```

```
ConcafP=(RESULTS*BPP)/1000
```

```
ConcafC=(RESULTS*BPC)/1000
```

```
"Hp e Dose Absorvida para P e C por faixa etária"
```

```
"Peixes"
```

```
DFISOHP1=(11.4/TF)*{5.4*10^-9,3.9*10^-8,  
7.3*10^-9,5.4*10^-8,3.6*10^-8,2.3*10^-7,3.1*10^-  
8,2.8*10^-8,8.5*10^-9,4.6*10^-9,5.5*10^-9,4.8*10^-  
8,1.8*10^-7,4.9*10^-8,1.0*10^-8,2.6*10^-8,1.5*10^-  
8,2.1*10^-8,3.2*10^-8,2.0*10^-8,6.6*10^-8,6.4*10^-10}
```

```
DFISOHP2=(11.4/TF)*{3.1*10^-9,1.3*10^-8,4.4*10^-  
9,2.7*10^-8,1.8*10^-8,7.3*10^-8,2.0*10^-8,1.8*10^-  
8,5.6*10^-9,3.2*10^-9,3.5*10^-9,3.0*10^-8,1.8*10^-  
7,4.4*10^-8,8.9*10^-9,1.6*10^-8,9.5*10^-9,1.2*10^-  
8,1.8*10^-8,1.3*10^-8,3.9*10^-8,3.5*10^-10}
```

```
DFISOHP3=(11.4/TF)*{1.9*10^-9,7.5*10^-9,2.6*10^-9,  
1.7*10^-8,8.9*10^-9,4.7*10^-8,1.0*10^-8,8.8*10^-  
9,3.0*10^-9,1.8*10^-9,1.8*10^-9,1.6*10^-8,1.0*10^-  
7,2.3*10^-8,4.7*10^-9,1.3*10^-8,6.1*10^-9,9.6*10^-  
9,9.2*10^-9,6.8*10^-9,1.9*10^-8,1.7*10^-10}
```

```
DFISOHP4=(8.91/TF)*{1.3*10^-9,4.7*10^-9,1.7*10^-  
9,1.1*10^-8,5.8*10^-9,6.0*10^-8,5.9*10^-9,5.2*10^-  
9,1.9*10^-9,1.1*10^-9,1.1*10^-9,8.3*10^-9,5.2*10^-  
8,1.0*10^-8,2.2*10^-9,1.4*10^-8,4.4*10^-9,1.0*10^-  
8,5.8*10^-9,4.2*10^-9,1.1*10^-8,9.5*10^-11}
```

```
DFISOHP5=(13/TF)*{8.7*10^-10,3.1*10^-9,1.1*10^-  
9,7.9*10^-9,4.0*10^-9,8.0*10^-8,3.3*10^-9,2.9*10^-  
9,1.2*10^-9,7.4*10^-10,7.6*10^-10,5.3*10^-9,3.4*10^-  
8,6.8*10^-9,1.4*10^-9,1.9*10^-8,3.4*10^-9,1.3*10^-  
8,3.7*10^-9,2.5*10^-9,6.5*10^-9,6.5*10^-11}
```

```
DFISOHP6=(20.5/TF)*{7.1*10^-10,1.8*10^-9,7.4*10^-  
10,3.4*10^-9,2.6*10^-9,2.8*10^-8,2.7*10^-9,2.4*10^-  
9,9.5*10^-10,5.8*10^-10,6.0*10^-10,3.8*10^-9,2.2*10^-  
8,4.3*10^-9,9.3*10^-10,1.9*10^-8,3.0*10^-9,1.3*10^-  
8,2.6*10^-9,2.0*10^-9,5.2*10^-9,5.0*10^-11}
```

```
"Crustaceos"
```

```
DFISOHC1=(1.02/TF)*{5.4*10^-9,3.9*10^-8,  
7.3*10^-9,5.4*10^-8,3.6*10^-8,2.3*10^-7,3.1*10^-  
8,2.8*10^-8,8.5*10^-9,4.6*10^-9,5.5*10^-9,4.8*10^-
```

```

8,1.8*10^-7,4.9*10^-8,1.0*10^-8,2.6*10^-8,1.5*10^-
8,2.1*10^-8,3.2*10^-8,2.0*10^-8,6.6*10^-8,6.4*10^-10}
DFISOHC2=(1.02/tf)*{3.1*10^-9,1.3*10^-8,4.4*10^-
9,2.7*10^-8,1.8*10^-8,7.3*10^-8,2.0*10^-8,1.8*10^-
8,5.6*10^-9,3.2*10^-9,3.5*10^-9,3.0*10^-8,1.8*10^-
7,4.4*10^-8,8.9*10^-9,1.6*10^-8,9.5*10^-9,1.2*10^-
8,1.8*10^-8,1.3*10^-8,3.9*10^-8,3.5*10^-10}
DFISOHC3=(1.02/tf)*{1.9*10^-9,7.5*10^-9,2.6*10^-9,
1.7*10^-8,8.9*10^-9,4.7*10^-8,1.0*10^-8,8.8*10^-
9,3.0*10^-9,1.8*10^-9,1.8*10^-9,1.6*10^-8,1.0*10^-
7,2.3*10^-8,4.7*10^-9,1.3*10^-8,6.1*10^-9,9.6*10^-
9,9.2*10^-9,6.8*10^-9,1.9*10^-8,1.7*10^-10}
DFISOHC4=(1.82/tf)*{1.3*10^-9,4.7*10^-9,1.7*10^-
9,1.1*10^-8,5.8*10^-9,6.0*10^-8,5.9*10^-9,5.2*10^-
9,1.9*10^-9,1.1*10^-9,1.1*10^-9,8.3*10^-9,5.2*10^-
8,1.0*10^-8,2.2*10^-9,1.4*10^-8,4.4*10^-9,1.0*10^-
8,5.8*10^-9,4.2*10^-9,1.1*10^-8,9.5*10^-11}
DFISOHC5=(1.86/tf)*{8.7*10^-10,3.1*10^-9,1.1*10^-
9,7.9*10^-9,4.0*10^-9,8.0*10^-8,3.3*10^-9,2.9*10^-
9,1.2*10^-9,7.4*10^-10,7.6*10^-10,5.3*10^-9,3.4*10^-
8,6.8*10^-9,1.4*10^-9,1.9*10^-8,3.4*10^-9,1.3*10^-
8,3.7*10^-9,2.5*10^-9,6.5*10^-9,6.5*10^-11}
DFISOHC6=(3.24/tf)*{7.1*10^-10,1.8*10^-9,7.4*10^-
10,3.4*10^-9,2.6*10^-9,2.8*10^-8,2.7*10^-9,2.4*10^-
9,9.5*10^-10,5.8*10^-10,6.0*10^-10,3.8*10^-9,2.2*10^-
8,4.3*10^-9,9.3*10^-10,1.9*10^-8,3.0*10^-9,1.3*10^-
8,2.6*10^-9,2.0*10^-9,5.2*10^-9,5.0*10^-11}
"DOse Efetiva P e C"

```

```

DefP1=ConcafP*DFISOHP1
DefP2=ConcafP*DFISOHP2
DefP3=ConcafP*DFISOHP3
DefP4=ConcafP*DFISOHP4
DefP5=ConcafP*DFISOHP5
DefP6=ConcafP*DFISOHP6
DefC1=ConcafC*DFISOHC1
DefC2=ConcafC*DFISOHC2
DefC3=ConcafC*DFISOHC3
DefC4=ConcafC*DFISOHC4
DefC5=ConcafC*DFISOHC5
DefC6=ConcafC*DFISOHC6
"somatorio dose"

```

```

DoseP={Total [DefP1] ,Total [DefP2] ,Total [DefP3] ,Total [De
fP4] ,Total [DefP5] ,Total [DefP6] }
DoseC={Total [DefC1] ,Total [DefC2] ,Total [DefC3] ,Total [De
fC4] ,Total [DefC5] ,Total [DefC6] }
"Doses Efetivas acumuladas em 1 ano Peixes +
Crustaceos"

```

```

(DoseC[[1]]+DoseP[[1]])
(DoseC[[2]]+DoseP[[2]])

```

(DoseC[[3]]+DoseP[[3]])
(DoseC[[4]]+DoseP[[4]])
(DoseC[[5]]+DoseP[[5]])
(DoseC[[6]]+DoseP[[6]])

Apêndice IV

Programa para cálculo de dose do RP2

```

ρb=1100.0
x=720.0
θ=0.10
n=0.013
b=6.0
y=0.56
H=0.928
A=b*y
R=(b*y)/(b+2*y)
i=0.0349
tf=24*365
"U e qr em m/h e m³/h respectivamente"
U=(1/n)*(R^(2/3))*(i^(0.5))*3600
qr=U*A
"Condutividade Hidraulica em m/h"
K=3600*10*10^-11
"INF metros por hora"
Vdarcy=(K*i)/θ
"Ordem do Kd Mn,Co(x2),Ni,Zn,Sr,Y,Ag,Sb(x3),Cs(x2),Ba"
Kd=10^-3*{1.2*10^3,4.8*10^2,4.8*10^2,2.8*10^2,9.5*10^2,5.2*10^1,4.7*10^1,3.8*10^2,5.0*10^1,5.0*10^1,5.0*10^1,1.2*10^2,1.2*10^2,4.0*10^(-1)}
"Coefficiente de Retardo por elemento"
Rd=1+(ρb*Kd/θ)
"ALF por elemento"
ALFi=Vdarcy/(H*θ*Rd)
"A em Bq e λ em (1/h)"
Mn54={3.10*10^9,9.24196*10^(-5)}
Co58={3.89*10^9,0.000407926}
Co60={1.66*10^10,1.50116*10^(-05)}
Ni63={2.02*10^10,8.24233*10^(-07)}
Zn65={6.04*10^8,0.000118414}
Sr90={4.56*10^8,0.000991797}
Y90={4.56*10^8,0.649825482}
Ag110={1.00*10^9,0.000115571}
Sb122={3.34*10^9,0.010696716}
Sb124={1.15*10^10,0.000479753}
Sb125={5.40*10^9,2.85655*10^(-05)}
Cs134={1.16*10^10,3.83736*10^(-05)}
Cs137={6.23*10^10,2.63755*10^(-06)}
Bam137={5.89*10^10,16.29656381}
ISO={Mn54,Co58,Co60,Ni63,Zn65,Sr90,Y90,Ag110,Sb122,Sb124,Sb125,Cs134,Cs137,Bam137}
TOTAL=1.993*10^11
RESULTS={}

```

```
j=1
```

```
"Concentrações na saída do Canal em Bq/h"
```

```
Do[Conc =
```

$$\int_0^{tf} e^{(-x*ISO[[j,2]]/U)} * \left(\frac{3}{qr} * ISO[[j,1]] * ALFi[[j]] \right) * e^{(-t*(ISO[[j,2]]+ALFi[[j]])} dt ;$$

```

RESULTS = Append[RESULTS, Conc],

{j, 14}];
Print[RESULTS]

"Fator de Bioacumulação para peixes e crustaceos"
BPP={400,1000,1000,1000,1000,2,20,500,400,400,400,100,
100,10}
BPC={5000,5000,5000,2000,50000,2,1000,10000,400,400,40
0,30,30,1}
"Concentração da Atividade no Alimento marinho"
ConcafP=(RESULTS*BPP)/1000
ConcafC=(RESULTS*BPC)/1000
"Hp e Dose efetiva por isotopo e faixa etária"
DFISOHP1=(11.4/tf)*{5.4*10^-09,7.3*10^-09,5.4*10^-
08,1.6*10^-09,3.6*10^-08,2.3*10^-07,3.1*10^-
08,2.4*10^-08,1.8*10^-08,2.5*10^-08,1.1*10^-
08,2.6*10^-08,2.1*10^-08,2.1*10^-08}
DFISOHP2=(11.4/tf)*{3.1*10^-09,4.4*10^-09,2.7*10^-
08,8.4*10^-10,1.6*10^-08,7.3*10^-08,2.0*10^-
08,1.4*10^-08,1.2*10^-08,1.6*10^-08,6.1*10^-
09,1.6*10^-08,1.2*10^-08,1.2*10^-08}
DFISOHP3=(11.4/tf)*{1.9*10^-09,2.6*10^-09,1.7*10^-
08,4.6*10^-10,9.7*10^-09,4.7*10^-08,1.0*10^-
08,7.8*10^-09,6.1*10^-09,8.4*10^-09,3.4*10^-
09,1.3*10^-08,9.6*10^-09,9.6*10^-09}
DFISOHP4=(8.91/tf)*{1.3*10^-09,1.7*10^-09,1.1*10^-
08,2.8*10^-10,6.4*10^-09,6.0*10^-08,5.9*10^-
09,5.2*10^-09,3.7*10^-09,5.2*10^-09,2.1*10^-
09,1.4*10^-08,1.0*10^-08,1.0*10^-08}
DFISOHP5=(13/tf)*{8.7*10^-10,1.1*10^-09,7.9*10^-
09,1.8*10^-10,4.5*10^-09,8.0*10^-08,3.3*10^-
09,3.4*10^-09,2.1*10^-09,3.2*10^-09,1.4*10^-
09,1.9*10^-08,1.3*10^-08,1.3*10^-08}
DFISOHP6=(20.5/tf)*{7.1*10^-10,7.4*10^-10,3.4*10^-
09,1.5*10^-10,3.9*10^-09,2.8*10^-08,2.7*10^-
09,2.8*10^-09,1.7*10^-09,2.5*10^-09,1.1*10^-
09,1.9*10^-08,1.3*10^-08,1.3*10^-08}
DFISOHC1=(1.02/tf)*{5.4*10^-09,7.3*10^-09,5.4*10^-
08,1.6*10^-09,3.6*10^-08,2.3*10^-07,3.1*10^-
08,2.4*10^-08,1.8*10^-08,2.5*10^-08,1.1*10^-
08,2.6*10^-08,2.1*10^-08,2.1*10^-08}
DFISOHC2=(1.02/tf)*{3.1*10^-09,4.4*10^-09,2.7*10^-
08,8.4*10^-10,1.6*10^-08,7.3*10^-08,2.0*10^-
08,1.4*10^-08,1.2*10^-08,1.6*10^-08,6.1*10^-
09,1.6*10^-08,1.2*10^-08,1.2*10^-08}
DFISOHC3=(1.02/tf)*{1.9*10^-09,2.6*10^-09,1.7*10^-
08,4.6*10^-10,9.7*10^-09,4.7*10^-08,1.0*10^-
08,7.8*10^-09,6.1*10^-09,8.4*10^-09,3.4*10^-
09,1.3*10^-08,9.6*10^-09,9.6*10^-09}
DFISOHC4=(1.82/tf)*{1.3*10^-09,1.7*10^-09,1.1*10^-
08,2.8*10^-10,6.4*10^-09,6.0*10^-08,5.9*10^-

```

```

09,5.2*10^-09,3.7*10^-09,5.2*10^-09,2.1*10^-
09,1.4*10^-08,1.0*10^-08,1.0*10^-08}
DFISOHC5=(1.86/tf)*{8.7*10^-10,1.1*10^-09,7.9*10^-
09,1.8*10^-10,4.5*10^-09,8.0*10^-08,3.3*10^-
09,3.4*10^-09,2.1*10^-09,3.2*10^-09,1.4*10^-
09,1.9*10^-08,1.3*10^-08,1.3*10^-08}
DFISOHC6=(3.24/tf)*{7.1*10^-10,7.4*10^-10,3.4*10^-
09,1.5*10^-10,3.9*10^-09,2.8*10^-08,2.7*10^-
09,2.8*10^-09,1.7*10^-09,2.5*10^-09,1.1*10^-
09,1.9*10^-08,1.3*10^-08,1.3*10^-08}
"Dose Efetiva P e C por faixa etária"
DefP1=ConcafP*DFISOHP1
DefP2=ConcafP*DFISOHP2
DefP3=ConcafP*DFISOHP3
DefP4=ConcafP*DFISOHP4
DefP5=ConcafP*DFISOHP5
DefP6=ConcafP*DFISOHP6
DefC1=ConcafC*DFISOHC1
DefC2=ConcafC*DFISOHC2
DefC3=ConcafC*DFISOHC3
DefC4=ConcafC*DFISOHC4
DefC5=ConcafC*DFISOHC5
DefC6=ConcafC*DFISOHC6
"somatorio Dose"
DoseP={Total [DefP1] , Total [DefP2] , Total [DefP3] , Total [De
fP4] , Total [DefP5] , Total [DefP6] }
DoseC={Total [DefC1] , Total [DefC2] , Total [DefC3] , Total [De
fC4] , Total [DefC5] , Total [DefC6] }

(DoseP[[1]]+DoseC[[1]])
(DoseP[[2]]+DoseC[[2]])
(DoseP[[3]]+DoseC[[3]])
(DoseP[[4]]+DoseC[[4]])
(DoseP[[5]]+DoseC[[5]])
(DoseP[[6]]+DoseC[[6]])

```