

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE BIOLOGIA ROBERTO ALCÂNTARA GOMES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOLOGIA

**ESTUDO DA EXPOSIÇÃO INTERNA A COMPOSTOS
DE URÂNIO NA FABRICAÇÃO DO ELEMENTO
COMBUSTÍVEL NUCLEAR NO BRASIL**

Maristela Souza Santos

Orientador:

Dra. Joyce Landmann Lipsztein – IBRAG-UERJ

Rio de Janeiro

2006

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE BIOLOGIA ROBERTO ALCÂNTARA GOMES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOLOGIA

**ESTUDO DA EXPOSIÇÃO INTERNA A COMPOSTOS
DE URÂNIO NA FABRICAÇÃO DO ELEMENTO
COMBUSTÍVEL NUCLEAR NO BRASIL**

Maristela Souza Santos

Tese submetida ao Instituto de Biologia da
Universidade do Estado do Rio de Janeiro
como parte dos requisitos para obtenção do
grau de Doutor em Ciências (Área de
Concentração em Biociências Nucleares)

Rio de Janeiro

2006

FICHA CATALOGRÁFICA

Santos, Maristela Souza

***Estudo da Exposição Interna a Compostos de Urânio na
Fabricação do Elemento Combustível Nuclear No Brasil.***

xxix, 208 p.:il

Orientador: Dra. Joyce Landmann Lipsztein

Tese (Doutorado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro,
Instituto de Biologia.

1. Dosimetria Interna. 2. Cálculo de dose. 3. Bioanálise in vitro
4. óxido de urânio

I. Lipsztein, Joyce Landmann. II. Universidade do Estado do Rio

**ESTUDO DA EXPOSIÇÃO INTERNA A COMPOSTOS DE URÂNIO NA
FABRICAÇÃO DO ELEMENTO COMBUSTÍVEL NUCLEAR NO
BRASIL.**

Maristela Souza Santos

Orientador: Dra. Joyce Landmann Lipsztein

Aprovada em 19 de Junho de 2006 pela banca examinadora.

Dr. Antônio Carlos de Freitas

Dra. Adelaide Maria Gondin da Fonseca Azeredo

Dra. Dunstana Rabelo de Melo

Dra. Maria Cristina Lourenço

Dra. Joyce Landmann Lipsztein

Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Junho 2006

“É pau, é pedra
É o fim do caminho...
São as águas de março fechando o verão
É promessa de vida no meu coração”

(Tom Jobim)

Aos meus pais, Zélia e Jurandir,
meu marido, Eduardo, minhas filhas e sobrinhos

AGRADECIMENTOS

- À Dra. Joyce Landmann Lipsztein, pela orientação da tese.
- À direção do Instituto de Radioproteção e Dosimetria pela oportunidade de realizar o doutorado.
- Às chefias atual e anterior do Serviço de Monitoração Individual Interna do Instituto de Radioproteção e Dosimetria, nas pessoas das Dras. Maria Cristina Lourenço e Dunstana Rabelo de Melo, pelo apoio na realização do doutorado.
- À chefia do Laboratório de Bioanálise *In Vitro*, na pessoa da Dra. Lígia Julião, pelo apoio na realização do trabalho, pela amizade e ajuda nos momentos de dificuldade.
- Ao Paulo César Fernandes pela inestimável ajuda nas atividades desenvolvidas em laboratório.
- Aos amigos do Laboratório de Bioanálise *In Vitro*, Wanderson Sousa e Sheila Nascimento, pela ajuda durante a realização do trabalho.
- À Dra. Maria Luiza Godoy, pela análise das urinas através da técnica de ICP-MS.
- Aos amigos Denison Souza Santos, Ana Cristina de Holanda, Kenya Moore e Sueli Mesquita, pelo estímulo e carinho durante a realização deste trabalho.
- Aos colegas dos Serviços de Monitoração Individual Interna e Externa, pelo carinho e amizade.
- A todas as pessoas que de alguma forma colaboraram para a realização deste trabalho.
- Ao meu marido, Eduardo e minhas filhas, Luiza e Laura pelo amor e compreensão que sempre me transmitiram.
- À Deus por estar comigo em todos os momentos.

LISTA DE TABELAS

2.1 - Isótopos de urânio	3
2.2 - Valores de referência para os parâmetros de absorção para materiais dos tipos F, M ou S (ICRP, 1994).	21
2.3 - Parâmetros específicos para UO_2 derivados a partir de experimentos <i>in vitro</i> e <i>in vivo</i> (Ansorborlo e cols, 1998; Ansbolo e cols, 2002; Cazel e cols, 2001)	23
2.4 - Média dos parâmetros específicos para UO_2 derivados a partir de experimentos <i>in vivo</i> (Ansorborlo e cols, 1998; Ansbolo e cols, 2002; Cazel e cols, 2001).	24
2.5 - Parâmetros específicos para o UO_2 derivados de experimentos <i>in vitro</i> e <i>in vivo</i> .	24
2.6-Incorporação anual de ^{238}U pela dieta alimentar (UNSCEAR, 2000).	34
2.7 - Concentração de urânio em amostras de fezes de moradores da cidade do Rio de Janeiro (Sousa, 2005).	37
2.8 - Concentração de ^{238}U na urina dos moradores da cidade do Rio de Janeiro (Sousa,2005).	38
2.9 - Concentração média de ^{238}U na urina dos moradores da Cidade do Rio de Janeiro.	38
4.1 - Resultados das atividades de urânio nas amostras de excreção dos trabalhadores do Grupo 1.	51
4.2 - Resultados das atividades de urânio nas amostras de excreção dos trabalhadores do Grupo 2.	52
4.3 – Atividades de ^{238}U nas amostras de fezes dos trabalhadores do Grupo 2 (exposto), após o desconto da contribuição ambiental	55
4.4 - Atividades de ^{238}U nas amostras de urina dos trabalhadores do Grupo 2 (exposto) após o desconto da contribuição ambiental	56
4.5 - Atividades de ^{234}U nas amostras de fezes dos trabalhadores do Grupo 2, após o desconto da contribuição ambiental.	57

4.6 – Atividades de ^{234}U nas amostras de urina dos trabalhadores do Grupo 2, após o desconto da contribuição ambiental.	57
4.7 - Razão urina-fezes entre as concentrações de ^{238}U em amostras de 24 h dos trabalhadores do Grupo 2	58
4.8 - Razão urina-fezes entre as concentrações de ^{234}U em amostras de 24 h dos trabalhadores do Grupo 2.	59
4.9 - Parâmetros utilizados na simulação da incorporação de compostos de diferentes solubilidades.	60
4.10 - Atividades de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 189, amostras coletadas em 20/04/02.	61
4.11 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua, durante 105 dias, de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão e coleta no dia seguinte.	62
4.12 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção, e incorporação via ingestão, considerando-se a incorporação de curta duração, e coleta de fezes e urina até 5 dias após a exposição.	63
4.13 - Atividades de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 191, amostras coletadas em 20/04/02.	64
4.14 - Atividades de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 183, amostras coletadas em 13/05/02.	65
4.15 - Atividades de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 186, amostras coletadas em 13/05/02.	67
4.16 - Atividades de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 210, amostras coletadas em 13/05/02.	68
4.17 - Atividade incorporada e dose efetiva para os trabalhadores da Unidade 1 utilizando os resultados de excreção urinária e fecal	70
4.18 - Resultados das atividades de urânio nas amostras de fezes e urina de trabalhadores da Unidade 2. Amostras coletadas em março de 2002, com a fábrica	73

em funcionamento.	
4.19 - Resultados das atividades de urânio nas amostras de fezes e urina de trabalhadores da Unidade 2, amostras coletadas em abril de 2002.	74
4.20 - Resultados das atividades de urânio nas amostras de fezes e urina de trabalhadores da Unidade 2, amostras coletadas em maio de 2002.	74
4.21 - Resultados das atividades de urânio nas amostras de fezes e urina de trabalhadores da Unidade 2, amostras coletadas nos meses de junho, agosto e dezembro de 2002.	75
4.22 - Atividades de urânio nas amostras de fezes e urina dos trabalhadores da Unidade 2 classificados no Grupo 1.	81
4.23 - Concentrações de urânio nas amostras de fezes e urina dos trabalhadores da Unidade 2 classificados no Grupo 2.	81
4.24 - Atividades de ^{238}U nas amostras de fezes dos trabalhadores do Grupo 2.	83
4.25 - Atividades de ^{238}U nas amostras de urina dos trabalhadores do Grupo 2.	84
4.26 - Razão urina-fezes dos trabalhadores (prensa, retífica, sinterização e peneiramento) do Grupo 2.	85
4.27- Parâmetros utilizados na simulação da incorporação de compostos de diferentes solubilidades (parâmetros descritos no Capítulo 2).	87
4.28- Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina- fezes experimental do trabalhador 146, amostras coletadas em 07/04/02.	88
4.29 - Frações teóricas de urânio nas amostras de fezes e urina a partir da simulação da incorporação durante 68 dias por inalação de compostos tipo F, M, S e UO_2 , com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão. Considera-se que as amostras foram coletadas 78 dias após o início da exposição.	88
4.30 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua por inalação durante 78 dias de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão.	89

4.31 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação por inalação de compostos tipo F, M, S e UO ₂ com diferentes parâmetros de absorção, e incorporação via ingestão, considerando-se incorporação de curta duração e coleta de fezes e urina até cinco dias após a exposição.	91
4.32 - Razões urina-fezes teóricas a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO ₂ com diferentes parâmetros de absorção, e incorporação via ingestão, considerando-se incorporação de curta duração e coleta de fezes e urina até 20 dias após a exposição.	92
4.33 - Atividades de ²³⁸ U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 146 , amostras coletadas em 15/02/03.	93
4.34 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 67 dias de compostos tipo F, M, S e UO ₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório, e incorporação via ingestão.	94
4.35 - Atividades de ²³⁸ U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 232, amostras coletadas em 03/05/02.	95
4.36 – Atividades de ²³⁴ U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 232, amostras coletadas em 03/05/02	95
4.37 - Atividades de ²³⁸ U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 232, amostras coletadas em 17/04/03.	96
4.38 - Atividades de ²³⁸ U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 219, amostras coletadas em 01/05/02.	97
4.39 - Atividades de ²³⁸ U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 275, amostras coletadas em 16/08/02.	98
4.40 - Atividades de ²³⁸ U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 275, amostras coletadas em 16/02/03	99
4.41 - Atividades de ²³⁸ U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 215, amostras coletadas em 28/04/02.	100
4.42 - Atividades de ²³⁴ U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 215, amostras coletadas em 28/04/02.	100

4.43 - Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 215, amostras coletadas em 17/04/03.	101
4.44 - Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 216, amostras coletadas em 19/05/02.	102
4.45 - Atividades de de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 216, amostras coletadas em 19/05/02.	102
4.46 - Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 164, amostras coletadas em 15/04/02.	103
4.47 - Atividades de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 164, amostras coletadas em 15/04/02.	103
4.48 - Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 141, amostras coletadas em 07/04/02.	104
4.49 - Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 276, amostras coletadas em 07/08/02.	105
4.50 - Atividade de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 276, amostras coletadas em 16/03/03.	106
4.51 - Atividades incorporadas e dose efetiva para os trabalhadores da Prensa utilizando a excreção urinária e fecal, considerando incorporação via inalação de ^{234}U .	108
4.52 - Atividades incorporadas e dose efetiva para os trabalhadores da Retífica e da Sinterização utilizando a excreção urinária e fecal, considerando incorporação via inalação de ^{234}U .	109
4.53 - Atividades incorporadas e dose efetiva para o trabalhador do Peneiramento em 2002 utilizando a excreção urinária e fecal, considerando incorporação via inalação de ^{234}U .	111
4.54 - Atividades incorporadas e dose efetiva para o trabalhador do Peneiramento em 2003 utilizando a excreção urinária e fecal, considerando incorporação via inalação de ^{234}U .	112
4.55 - Atividades de urânio nas amostras de urina e fezes dos trabalhadores coletadas no mês de abril.	113

4.56 – Atividades de urânio nas amostras de urina e fezes coletadas no mês de maio.	113
4.57 - Atividades de urânio nas amostras de urina e fezes dos trabalhadores coletadas nos meses de agosto e outubro.	114
4.58 - Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes dos trabalhadores do Grupo 1	115
4.59 - Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes dos trabalhadores do Grupo 2	115
4.60 – Atividades de ^{238}U nas amostras de fezes dos trabalhadores do Grupo 2, após o desconto da contribuição da exposição ambiental.	116
4.61 - Atividades de ^{238}U nas amostras de urina dos trabalhadores do Grupo 2 , após o desconto da contribuição da exposição ambiental.	117
4.62 - Razões entre as concentrações de urânio na urina e nas fezes (urina-fezes) experimentais calculadas a partir do dados dos trabalhadores do Grupo 2 após o desconto da contribuição da exposição ambiental.	117
4.63 - Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 236, amostras coletadas em 01/05/02.	119
4.64 - Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 224, amostras coletadas em 15/05/02	120
4.65 - Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e de fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 227, amostras coletadas em 01/05/02	121
4.66 - Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e de fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 227, amostras coletadas em 16/08/02	122
4.67 - Atividades incorporadas e dose efetiva para os trabalhadores dos setor do Leito Fluidizado utilizando a excreção urinária e fecal, considerando incorporação via inalação de ^{234}U .	124
4.68 - Atividades incorporadas e dose efetiva para o trabalhador do setor de Precipitação utilizando a excreção urinária e fecal, considerando incorporação via inalação de ^{234}U .	126

A.1.1 - Atividades de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e razão urina- fezes experimental do trabalhador 191, amostras coletadas em 20/04/02	137
A.1.2 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 105 dias de compostos Tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão e coleta no dia seguinte.	138
A.1.3 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando-se incorporação de curta duração e coleta de fezes e urina até 5 dias após exposição	139
A.2.1 - Atividades de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e razão urina- fezes experimental do trabalhador 183 coletadas em 13/05/02	140
A.2.2 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 131 dias de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão e coleta no dia seguinte.	141
A.2.3 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando-se incorporação de curta duração e coleta de fezes e urina até 5 dias após exposição.	142
A.3.1 - Atividades de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e razão urina- fezes experimental do trabalhador 186, amostras coletadas em 13/05/02	143
A.4.1 - Atividades de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 210, amostras coletadas em 13/05/02	145
B.1.1 - Atividades ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 232, amostras coletadas em 03/05/02.	147
B.1.2 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 68 dias de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão,	148

considerando a coleta a amostra 104 dias após o início da exposição	
B.1.3 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 103 dias de compostos tipo F, M, S e UO ₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando que as amostras foram coletadas 104 dias após o início da exposição	150
B.1.4 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO ₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando-se incorporação de curta duração e coleta de fezes e urina 1 dia após exposição recente	151
B.1.5 - Atividades de ²³⁴ U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 232, amostras coletadas em 03/05/02	152
B.2.1 - Atividades de ²³⁸ U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 232, amostras coletadas em 17/04/03	154
B.2.2 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 127 dias de compostos tipo F, M, S e UO ₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando que as amostras foram coletadas 128 dias após o início da exposição	154
B.2.3 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO ₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando-se incorporação de curta duração	156
B.3.1 - Atividades de ²³⁸ U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 219 coletadas em 01/05/02	155
B.3.2 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 68 dias de compostos tipo F, M, S e UO ₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando que as amostras foram coletadas 102 dias após o início da exposição	158
B.3.3 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 102 dias de compostos tipo F, M, S e UO ₂ com	159

diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão	
B.3.4 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO ₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando-se incorporação de curta duração e coleta de fezes e urina 1 dia após exposição	160
B.4.1 - Atividades de ²³⁸ U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 273 , amostras coletadas em 08/12/02	161
B.5.1 - Atividades de ²³⁸ U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 275, amostras coletadas em 16/08/02	162
B.5.2 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 68 dias de compostos tipo F, M, S e UO ₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão e coleta das amostras 209 dias após o início da exposição	163
B.5.3 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 208 dias de compostos tipo F, M, S e UO ₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão	164
B.5.4 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO ₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando-se incorporação de curta duração	165
B.6.1 - Atividades de ²³⁸ U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 275, amostras coletadas em 16/02/03	166
B.6.2 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 67 dias de compostos tipo F, M, S e UO ₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão e coleta das amostras 68 dias após o início da exposição	167
B.7.1 - Atividades de ²³⁸ U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 215, amostras coletadas em 28/04/02	168

B.7.2 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 68 dias de compostos tipo F, M, S e UO ₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão e coleta das amostras 99 dias após o início da exposição	169
B.7.3 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 99 dias de compostos tipo F, M, S e UO ₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão e amostra coletada no dia seguinte	170
B.7.4 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO ₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando-se incorporação de curta duração e coleta de fezes e urina 1 dia após exposição	171
B.7.5 - Atividades de ²³⁴ U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 215, amostras coletadas em 28/04/02	173
B.8.1 - Atividades de ²³⁸ U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 215, amostras coletadas em 17/04/03	174
B.8.2 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 127 dias de compostos tipo F, M, S e UO ₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão e coleta das amostras 128 dias após o início da exposição	175
B.8.3 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO ₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando-se incorporação de curta duração	176
B.8.4 - Razões urina-fezes teóricas a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO ₂ com diferentes parâmetros de absorção, e incorporação via ingestão, considerando-se incorporação de curta duração e coleta de fezes e urina até 20 dias após a exposição.	177
B.9.1 - Atividades de ²³⁸ U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 216, amostras coletadas em 19/05/02	178

B.9.2 - Atividades de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 216, amostras coletadas em 19/05/02	178
B.9.3 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação durante 68 dias por inalação de alguns compostos de urânio com parâmetros descritos na literatura e ingestão e coleta 120dias após o início da exposição	179
B.9.4 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 120 dias de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão e amostra coletada no dia seguinte	180
B.9.5 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando-se incorporação de curta duração	181
B.10.1 - Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 164, amostras coletadas em 15/04/02	182
B.10.2 - Atividades de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 164, amostras coletadas em 15/04/02	182
B.10.3 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão Simulação da incorporação durante 68 dias por inalação de alguns compostos de urânio com parâmetros descritos na literatura e ingestão e coleta 86 dias após o início da exposição	183
B.10.4 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 85 dias de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão e amostra coletada no dia seguinte	184

B.10.5 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO ₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando-se incorporação de curta duração	186
B 11.1 - Atividades de ²³⁸ U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 141, amostras coletadas em 07/04/02	187
B.11.2 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 76 dias de compostos tipo F, M, S e UO ₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão e amostra coletada depois de dois dias	188
B.11.3 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO ₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando-se incorporação de curta duração	189
B.12.1 - Atividades de ²³⁸ U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 276, amostras coletadas em 07/08/02	190
B.12.2 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 200 dias de compostos tipo F, M, S e UO ₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão e amostra coletada depois de 1 dia.	191
B.12.3 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO ₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando-se incorporação de curta duração	192
B.13.1 - Atividades de ²³⁸ U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 276, amostras coletadas em 16/03/03	193

B.13.2 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 85 dias de compostos tipo F, M, S e UO ₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão e amostra coletada depois de 1 dia.	194
B.13.3 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO ₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando-se incorporação de curta duração	195
B.14.1 – Atividades de ²³⁸ U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 236, amostras coletadas em 01/05/02	196
B.14.2 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 111 dias de compostos tipo F, M, S e UO ₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão e amostra coletada no dia seguinte	197
B.14.3 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO ₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando-se incorporação de curta duração	198
B.15.1 – Atividades de ²³⁸ U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 224, amostras coletadas em 15/05/02	199
B.15.2 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 122 dias de compostos tipo F, M, S e UO ₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão e amostra coletada no dia seguinte	200
B.15.3 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO ₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando-se incorporação de curta duração	201

B.16.1 - Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 227 , amostras coletadas em 01/05/02	202
B.16.2 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 111 dias de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão e amostra coletada no dia seguinte	204
B.16.3 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando-se incorporação de curta duração	205
B.17.1 - Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina-fezes experimental do trabalhador 227, amostras coletadas em 16/08/02	206
B.17.2 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 218 dias de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão e amostra coletada no dia seguinte	207
B.17.3 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando-se incorporação de curta duração	208

LISTA DE QUADROS

2.1- Concentração de urânio (^{238}U) na urina de habitantes não ocupacionalmente expostos apresentados na literatura	34
--	----

LISTA DE FIGURAS

2.1 - Série de decaimento radioativo do ^{238}U	4
2.2 - Etapas do ciclo do combustível nuclear	5
2.3 - Principais ocorrências de urânio	6
2.4 - Fábrica de Combustível Nuclear	8
2.5 - Processo de obtenção do pó de UO_2	9
2.6 - Fabricação de pastilhas de UO_2	11
2.7 - Modelo para dosimetria interna do pulmão da publicação 66 da ICRP (1994)	18
2.8 - Modelo do Sistema Respiratório (ICRP 66, 1993)	18
2.9 - Modelo do Sistema gastrointestinal adotado na publicação 30 da ICRP (1979).	25
2.10 Esquema do modelo sistêmico para o urânio adotado pela ICRP 67	28
3.1 - Coluna cromatográfica	42
3.2 - Esquema da célula de deposição	43
3.3 - Espectro alfa de isótopos de urânio.	44
4.1 - Concentração de urânio teórica nas fezes (período de 131 dias de trabalho, com descanso semanal de dois dias).	53

4.2 - Concentração de urânio teórica na urina (131dias de trabalho com descanso semanal de dois dias)	53
4.3 - Concentração de ^{238}U teórica na urina após uma incorporação de curta duração.	54
4.4 - Concentrações de ^{238}U nas amostras de urina dos trabalhadores da produção de pastilhas, coletadas nos meses de março, abril, maio, junho, agosto e setembro	76
4.5 - Concentrações de ^{238}U nas amostras de fezes dos trabalhadores da produção de pastilha coletadas nos meses de março, abril, maio, junho, agosto e setembro	76
4.6 - Concentrações de ^{234}U em amostras de fezes dos trabalhadores da produção de pastilhas, coletadas nos meses de abril, maio, junho, agosto e setembro.	77
4.7- Concentrações teóricas de ^{238}U nas amostras de urina dos trabalhadores, coletadas durante o período de exposição de 68 dias, e após o período de exposição.	77
4.8 - Concentrações teóricas de ^{238}U nas amostras de fezes dos trabalhadores coletadas durante o período de exposição de 68 dias e após o período de exposição.	78
4.9 - Concentrações de ^{238}U nas amostras de urina do trabalhador do peneiramento, coletadas nos meses de abril e agosto.	78
4.10 - Concentrações de ^{238}U nas amostras de fezes do trabalhador do peneiramento, coletadas nos meses de abril e agosto	79
4.11 - Concentrações de ^{234}U nas amostras de fezes do trabalhador do peneiramento, coletadas nos meses de abril e agosto.	79
4.12 - Variação das razões teóricas urina-fezes para as diferentes solubilidades de urânio conforme o tempo pós exposição	90
4.13 - Concentração de ^{238}U nas amostras de urina dos grupos de trabalhadores da preparação de pó e do grupo da preparação da pastilha.	114

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE QUADROS	xxii
LISTA DE FIGURAS	xxii
RESUMO	xxviii
ABSTRACT	xxix
1 – INTRODUÇÃO	1
1.1- OBJETIVO	2
2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS	3
2.1- PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO URÂNIO	3
2.2- O CICLO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR NO BRASIL	5
2.2.1- MINERAÇÃO E BENEFICIAMENTO	6
2.2.2- ENRIQUECIMENTO E CONVERSÃO DO URÂNIO	7
2.2.3- FABRICAÇÃO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR	7
2.3 - A FÁBRICA DE COMBUSTÍVEL NUCLEAR (FCN)	8
2.3.1- RECONVERSÃO DE UF ₆ EM PÓ DE UO ₂	8
2.3.1.1- Vaporização do UF ₆	9
2.3.1.2- Precipitação do TCAU	9
2.3.1.3. Filtro rotativo	10
2.3.1.4- Leito fluidizado	10
2.3.1.5- Estabilizador	10
2.3.1.6- Homogeinizador	11
2.3.2- FABRICAÇÃO DE PASTILHAS DE UO ₂	11
2.3.2.1- Prensa Rotativa	11
2.3.2.2- Forno de Sinterização	12
2.3.2.3- Retífica	12
2.3.2.4- Montagem do Elemento Combustível	12
2.4- AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE EXPOSIÇÃO NAS ETAPAS DO PROCESSO NA FÁBRICA DE COMBUSTÍVEL NUCLEAR (FCN)	12

2.4.1 FABRICAÇÃO DO PÓ DE UO ₂	13
2.4.2 FORMAS QUÍMICAS DO URÂNIO NA FABRICAÇÃO DO PÓ DE UO ₂	16
2.5 PROPRIEDADES DO URÂNIO EM SISTEMAS FISIOLÓGICOS	16
2.6 MODELOS BIOCINÉTICOS	17
2.6.1- MODELO DOSIMÉTRICO PULMONAR DA ICRP 66 (1994)	17
2.6.1.1. Deposição de partículas inaladas	19
2.6.1.1- Depuração das partículas radioativas inaladas	19
2.6.2 MODELOS DO TRATO GASTRINTESTINAL	24
2.6.3 - MODELOS SISTÊMICOS DO URÂNIO	26
2.7- MONITORAÇÃO DE URÂNIO POR BIOANÁLISE	29
2.7.1- AMOSTRAS DE URINA	29
2.7.2- AMOSTRAS DE FEZES	31
2.8- FATORES QUE PODEM INFLUENCIAR A INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DA BIOANÁLISE <i>IN VITRO</i>	31
2.9- EXPOSIÇÃO AMBIENTAL AO URÂNIO	33
2.9.1- EXCREÇÃO NATURAL DE URÂNIO NA URINA	34
2.9.2- EXCREÇÃO NATURAL DE URÂNIO NAS FEZES	36
2.10- GRUPO CONTROLE: CONCENTRAÇÃO DE URÂNIO NA URINA E NAS FEZES DOS HABITANTES DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO	36
2.11- INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DE BIOANÁLISE	39
3 - METODOLOGIA	41
3.1- DEFINIÇÃO DO GRUPO EM ESTUDO	41
3.2- BIOANÁLISE <i>IN VITRO</i>	41
3.2.1- COLETA DAS AMOSTRAS	41
3.2.2 - DETERMINAÇÃO DE ²³⁸ U, ²³⁴ U E ²³⁵ U EM AMOSTRAS DE FEZES	42

3.2.2.1-	Procedimento de análise de urânio em amostras de fezes	42
3.2.2.2.	Cálculo do rendimento radioquímico e da atividade da amostra	44
3.2.2.3	Desconto da contribuição ambiental no cálculo da concentração de ^{238}U nas amostras de fezes	46
3.2.2.4	Desconto da contribuição ambiental no cálculo da concentração de ^{234}U nas amostras de fezes	46
3.2.3-	DETERMINAÇÃO DE ^{238}U EM AMOSTRAS DE URINA	46
3.2.3.1	Determinação de urânio em amostras de urina por ICP-MS	46
3.2.3.2	– Desconto da contribuição ambiental no cálculo da concentração de urânio nas amostras de urina.	47
3.3-	CÁLCULO DA ATIVIDADE INCORPORADA	48
3.4-	CÁLCULO DA DOSE EFETIVA COMPROMETIDA [$E_{(50)}$] (ICRP, 1977; IAEA, 1999B)	47
4-	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1-	UNIDADE 1 DA FCN	50
4.1.1-	BIOANÁLISE <i>IN VIVO</i>	50
4.1.2-	BIOANÁLISE <i>IN VITRO</i>	50
4.1.2.1-	ANÁLISE DOS DADOS DE BIOANÁLISE <i>IN VITRO</i>	50
4.1.3-	CÁLCULO DA ATIVIDADE INCORPORADA E DA DOSE EFETIVA COMPROMETIDA	69
4.2 -	UNIDADE 2 DA FCN	72
	-	
4.2.1-	BIOANÁLISE <i>IN VIVO</i>	73
4.2.2-	BIOANÁLISE <i>IN VITRO</i>	73
4.2.2.I	ANÁLISE DOS DADOS DE BIOANÁLISE <i>IN VITRO</i> DO GRUPO DE TRABALHADORES DA PRODUÇÃO DE PASTILHAS (PENEIRAMENTO, PRENSA, SINTERIZAÇÃO E RETÍFICA)	73

4.2.2.I - CÁLCULO DA ATIVIDADE INCORPORADA E DA DOSE EFETIVA COMPROMETIDA (UNIDADE 2)	107
4.2.2.II- ANÁLISE DOS DADOS DE BIOANÁLISE <i>IN VITRO</i> DO GRUPO DE TRABALHADORES DA PRECIPITAÇÃO E LEITO FLUIDIZADO	113
4.2.2.II -CÁLCULO DA ATIVIDADE INCORPORADA E DA DOSE EFETIVA COMPROMETIDA NO SETORES DO LEITO FLUIZADO E PRECIPITAÇÃO	123
5- CONCLUSÕES	127
BIBLIOGRAFIA	129
ANEXO A	137
ANEXO B	147

RESUMO

A ICRP (International Commission on Radiological Protection) Publicação 66 e o Supporting Guidance 3 recomendam que parâmetros específicos de retenção nos pulmões sejam utilizados para derivar as doses efetivas e interpretar os resultados de Bioanálise

Um grupo de 81 trabalhadores expostos a UO_2 na Fábrica de Combustível Nuclear (FCN) foi selecionado para avaliar a dose comprometida efetiva. Os trabalhadores foram monitorados por bioanálise in vitro através da análise de fezes e urina. A contribuição ambiental foi estimada e descontada ao determinar a razão urina:fezes. Determinou-se a incorporação do grupo em estudo. De acordo com a ICRP 66 o UO_2 é classificado como um composto Tipo S. O Supporting Guidance 3 da ICRP e algumas publicações recentes recomendam parâmetros específicos de retenção.

Os parâmetros da solubilidade do óxido manipulado na FCN foram avaliados tendo como base a razão urina:fezes excretada. A razão foi corrigida conforme a contribuição ambiental.

Este trabalho discute a aplicação dos parâmetros de retenção recomendados pelo modelo da ICRP aos dados experimentais e a dose efetiva comprometida calculada a partir dos parâmetros de retenção no pulmão. Discute também os problemas na interpretação dos resultados de monitoração, quando o trabalhador está exposto a diferentes compostos de diferentes solubilidades

ABSTRACT

The International Commission on Radiological Protection (ICRP) Publication 66 and Supporting Guidance 3) strongly recommends that specific information on lung retention parameters should be used in preference to default values wherever appropriate, for the derivation of effective doses and for bioassay interpretation of monitoring data.

A group of 81 workers exposed to UO_2 at the fuel fabrication facility in Brazil was selected to evaluate the committed effective dose. The workers were monitored for determination of uranium content in the urinary and faecal excretion. The contribution of intakes by ingestion and inhalation were assessed on the basis of the ratios of urinary to fecal excretion. For the selected workers it was concluded that inhalation dominated intake. According to ICRP 66, uranium oxide is classified as insoluble Type S compound. The ICRP Supporting Guidance 3 and some recent studies have recommended specific lung retention parameters to UO_2 .

The solubility parameters of the uranium oxide compound handled by the workers at the fuel fabrication facility in Brazil was evaluated on the basis of the ratios of urinary to fecal excretion. Excretion data were corrected for dietary intakes.

This paper will discuss the application of lung retention parameters recommended by the ICRP models to these data and also the dependence of the effective committed dose on the lung retention parameters. It will also discuss the problems in the interpretation of monitoring results, when the worker is exposed to several uranium compounds of different solubilities.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A incorporação de um radionuclídeo pode ocorrer via inalação, ingestão ou através da pele, sendo ele transferido, a diferentes taxas, para órgãos do corpo humano, e eliminado pela urina, fezes ou suor. A avaliação da exposição devido à incorporação de radionuclídeos é realizada através de técnicas de bioanálise *in vitro* e *in vivo*, associadas a métodos interpretativos dos resultados obtidos. A interpretação dos dados de bioanálise baseia-se em modelos matemáticos que simulam o comportamento biocinético do radionuclídeo no corpo humano, e que descrevem a incorporação, deposição, transferência e eliminação do material pelo metabolismo humano (Lourenço, 1997).

Apesar do progresso no desenvolvimento de modelos fisiológicos, incertezas permanecem. Muitas das informações utilizadas na construção de modelos biocinéticos são adquiridas de estudos com animais e com indivíduos expostos a radionuclídeos liberados acidentalmente. Para os compostos de urânio, podem ocorrer erros na estimativa da incorporação devido à ausência de dados biocinéticos, químicos e físicos do composto inalado (Lourenço, 1997; Ansoborlo e cols, 2002; Stradling e cols, 2002).

A exposição interna devido à incorporação de compostos de urânio constitui um risco potencial para a saúde dos trabalhadores na Fábrica de Combustível Nuclear – FCN, localizada em Resende, RJ, pertencente às Indústrias Nucleares do Brasil – INB. Na referida fábrica, ocorre o processo de reconversão de UF_6 (composto solúvel) para UO_2 (composto insolúvel) e a produção de pó e pastilha. Nela, os trabalhadores estão expostos a diferentes compostos de urânio enriquecido. Nesse tipo de instalação, a principal via de incorporação é a inalação, e o comportamento do particulado no pulmão depende do respectivo diâmetro aerodinâmico e da solubilidade do composto.

A Comissão Internacional de Proteção Radiológica – ICRP, em sua publicação 66 (1994), derivou valores genéricos de retenção no pulmão para compostos solúveis (classificados como tipo F), moderadamente insolúveis (classificados como tipo M) e insolúveis (classificados como tipo S). A ICRP publicou em 2003 (ICRP, 2003) um guia contendo parâmetros específicos para cada tipo de composto, sendo eles aparentemente muito mais solúveis que os apresentados na publicação 66 (ICRP, 1994).

1.1 – OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho é avaliar e caracterizar a exposição e as vias de incorporação dos diferentes compostos de urânio por trabalhadores nas duas Unidades da Fábrica de Combustível Nuclear (FCN).

Para tanto, as seguintes etapas foram planejadas:

- Coleta de amostras de urina e fezes de trabalhadores das Unidades da Fábrica de Combustível Nuclear (FCN).

- Estimativa da excreção diária de urânio em amostras de urina e fezes de trabalhadores das duas Unidades da Fábrica de Combustível Nuclear (FCN).

- Avaliação das possíveis vias de incorporação utilizando modelos metabólicos da literatura.

- Estimativa da incorporação e Dose Efetiva Comprometida em caso da Exposição ocupacional dos trabalhadores das duas Unidades da Fábrica de Combustível Nuclear (FCN).

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 – PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO URÂNIO

O urânio possui número atômico 92, pertence ao grupo IIIB da Tabela Periódica, e encontra-se na série dos actínídeos. Os principais isótopos de urânio são mostrados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Isótopos de urânio.

Isótopo	Meia-vida física
U-230	20,8 d
U-231	4,20 d
U-232	72 a
U-233	1,58E+05 a
U-234	2,44E+05 a
U-235	7,04E+08 a
U-236	2,34E+07 a
U-237	6,75 d
U-238	4,67E+09 a
U-239	0,392 h
U-240	14,1 h

O urânio ocorre na natureza, na crosta terrestre, na concentração média de 4×10^{-4} % em peso. Consiste de três isótopos emissores alfa: ^{238}U ($t_{1/2} = 4,5 \times 10^9$ anos), ^{235}U ($t_{1/2} = 7 \times 10^8$ anos) e ^{234}U ($t_{1/2} = 2,4 \times 10^5$ anos), com abundâncias isotópicas de 99,285%, 0,71% e 0,006%, respectivamente. A Figura 2.1 mostra a série de decaimento radioativo do ^{238}U (Plöger E, Vietzke, H, 1983).

Os principais estados de oxidação do urânio são +3, +4, +5 e +6. As formas mais estáveis são +6 e +4. Em solução aquosa e no corpo, devido à presença de oxigênio, a forma mais estável é o cátion UO_2^{+2} , denominado íon uranila (Anke e cols, 2004).

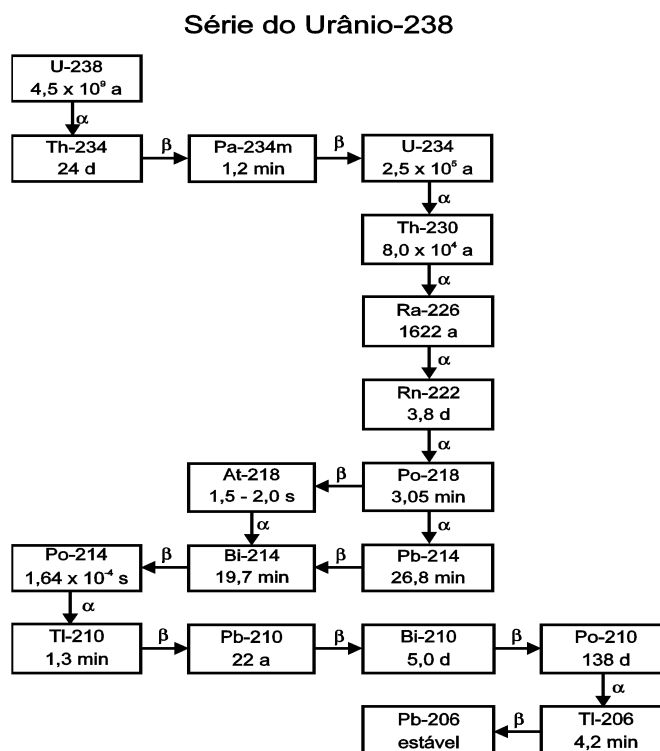


Figura 2.1: Série de decaimento radioativo do ^{238}U

O corpo humano contém, em média, 90 μg de urânio, consequência da incorporação do mesmo, via ingestão – água e dieta alimentar – e via inalação. O urânio incorporado é encontrado principalmente no esqueleto, fígado e rins (Roth e cols, 2003).

O urânio pode causar danos à saúde, tanto pela toxidez química – similar à do tungstênio, mercúrio, chumbo e cádmio – quanto pela toxidez radiológica do urânio ou dos produtos de decaimento, já que a maioria deles são emissores de radiação alfa. A toxicidade do urânio depende não somente da atividade incorporada, mas também da forma química – solúvel ou insolúvel – e da via de incorporação (Ch Zarkadas e cols, 2001).

Estudos com animais submetidos à exposição crônica a pequenas quantidades de urânio solúvel, via ingestão, por mais de um ano, revelam que o urânio afeta efetivamente os rins e, particularmente, o tecido ósseo, que é o tecido de deposição preferencial. Na forma insolúvel é essencialmente radiotóxico, sendo que os órgãos mais afetados são os pulmões e o tecido ósseo (WHO, 2001).

2.2 – O CICLO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR NO BRASIL

O urânio é largamente utilizado como combustível em reatores nucleares e em reatores de pesquisa. Ciclo do combustível nuclear é o nome dado às etapas industriais pelas quais o urânio passa, desde a mineração até o reprocessamento, após ser utilizado em um reator nuclear. A Figura 2.2 mostra todas as etapas do ciclo do combustível nuclear.

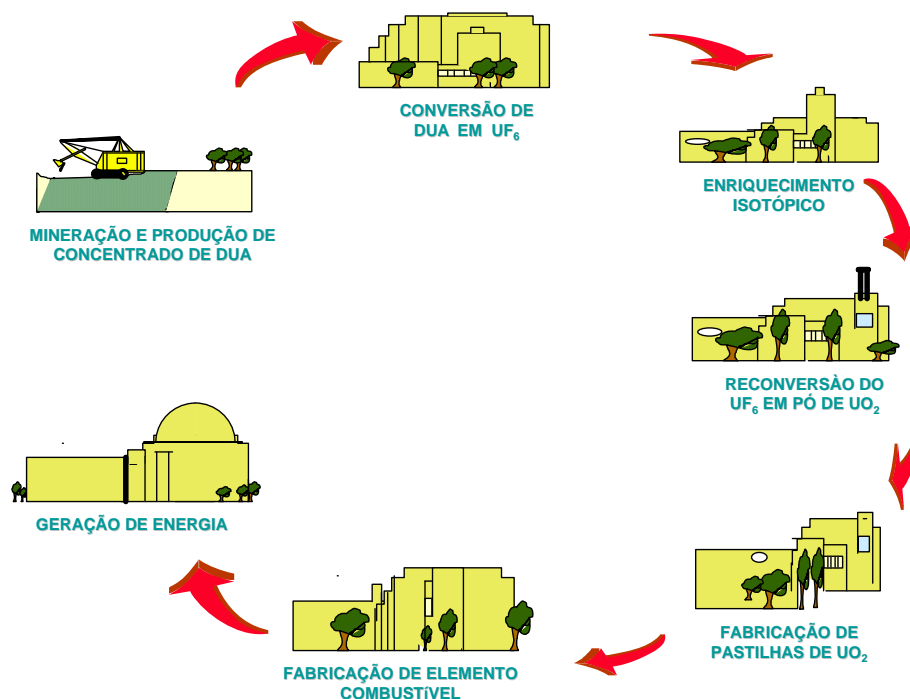


Figura 2.2: Etapas do ciclo do combustível nuclear.

Durante os anos de 1982 até 1999, o Brasil desenvolvia apenas parte do processo de fabricação do elemento combustível, que envolvia a mineração, o beneficiamento do urânio (produção de *yellowcake*) e montagem do elemento combustível. A partir de 1999, o País passou a desenvolver o processo de reconversão e fabricação de pastilhas, aumentando sua participação no ciclo do combustível. Com isso, aumentou a necessidade de serem assegurados meios eficientes de controle da dose devido à inalação e ingestão de compostos de urânio nas instalações que trabalham com fontes abertas.

As Indústrias Nucleares do Brasil – INB – atuam na área de mineração e exploração do urânio; produção de concentrado de U_3O_8 ; enriquecimento isotópico; reconversão do UF_6 em pó de dióxido de urânio (UO_2); fabricação de pastilhas de UO_2

em grau cerâmico nuclear; e fabricação e montagem do elemento combustível, para alimentação dos reatores de usinas nucleares.

2.2.1 – MINERAÇÃO E BENEFICIAMENTO

O Brasil detém uma das maiores reservas mundiais de urânio. São cerca de 300 mil toneladas de urânio, com ocorrências significativas nos Estados da Bahia – municípios de Lagoa Real e Caetité – e no Ceará – em Itaitaia, entre outras de menor porte. Até o momento só foi prospectado 25% do território nacional. O País dispõe também de ocorrências de urânio associado a outros bens minerais, como por exemplo os depósitos de Pitinga, no Estado do Amazonas, e os de Rio Cristalino, no sul do Estado do Pará.



Figura: 2.3: Principais ocorrências de urânio.

Na primeira etapa do ciclo do combustível nuclear, o minério de urânio é extraído da mina e enviado para a usina de beneficiamento. Nesta, o urânio é extraído do minério, purificado e concentrado sob a forma de um sal de cor amarela, conhecido como *yellowcake* ou concentrado de U_3O_8 . Tais atividades são desenvolvidas no município de Caetité, no Estado da Bahia.

Em junho de 2001, o Brasil registrou a sexta maior reserva geológica de urânio do mundo, com cerca de 309 mil toneladas de U_3O_8 , nos Estados da Bahia, Ceará, Paraná e Minas Gerais, entre outras ocorrências.

2.2.2 – ENRIQUECIMENTO E CONVERSÃO DO URÂNIO

Para alimentar os reatores que utilizam ^{235}U enriquecido, o teor de tal radionuclídeo deve ser aumentado antes da fabricação do combustível nuclear. O enriquecimento do urânio tem por objetivo aumentar a concentração de ^{235}U para acima da natural, para permitir a utilização como combustível para geração de energia elétrica. O urânio natural contém apenas 0,7% de ^{235}U ; já o urânio enriquecido, em torno de 3% a 5%.

O U_3O_8 obtido no beneficiamento do minério é convertido em UO_2 por uma reação de redução com H_2 . O UO_2 é convertido então em UF_4 pela adição do ácido fluorídrico (HF), e então a UF_6 usando o flúor (F_2). O produto gasoso, UF_6 , é então, enriquecido em ^{235}U . A maioria dessas etapas é realizada através do processo de ultracentrifugação (UNSCEAR, 2000).

A conversão do urânio brasileiro é realizada no exterior. Após a obtenção do U_3O_8 , este concentrado é enviado ao exterior, onde é feita a conversão em hexafluoreto de urânio (UF_6). Tal processo é realizado pelo consórcio URENCO, constituído por Holanda, Alemanha e Inglaterra, que desenvolveu a tecnologia de enriquecimento por ultracentrifugação.

2.2.3 – FABRICAÇÃO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR

Após ser enriquecido, o UF_6 é enviado em recipientes para a Fábrica de Combustível Nuclear – FCN, em Resende, RJ. Na Unidade II da referida fábrica é realizada a reconversão do UF_6 em UO_2 .

As pastilhas de urânio, depois de prontas, são submetidas à última etapa do ciclo do combustível nuclear, que é a montagem do elemento combustível, realizada na Unidade I da Fábrica de Combustível Nuclear – FCN.

A principal fonte de exposição durante a fabricação do combustível nuclear é o urânio. Isso pode resultar em exposição externa por emissão de raios gama e exposição interna por ingestão ou inalação de particulados contendo ^{234}U , ^{235}U e ^{238}U .

2.3 – A FÁBRICA DE COMBUSTÍVEL NUCLEAR (FCN) – (www.inb.gov.br)

A Fábrica de Combustível Nuclear (FCN), pertencente à INB, está localizada na cidade de Resende, no Estado do RJ. A Figura 2.4 apresenta uma vista panorâmica da FCN. Nesta unidade industrial estão localizadas a produção de pó e de pastilhas de dióxido de urânio, a produção de componentes e a montagem do elemento combustível.



Figura 2.4: Fábrica de Combustível Nuclear (FCN).

Basicamente, podemos dividir a operação da Fábrica de Combustível Nuclear (FCN) em:

- Reconversão de UF_6 em pó de UO_2 ;
- Fabricação de pastilhas de UO_2 ;
- Montagem do Elemento Combustível.

2.3.1 – RECONVERSÃO DE UF_6 EM PÓ DE UO_2

Reconverter gás em pó é concentrar o urânio de maneira apropriada para sua utilização como combustível nuclear. A principal matéria-prima dessa etapa do processo é o urânio enriquecido na forma de hexafluoreto de urânio (UF_6), com nível de enriquecimento da ordem de 0,71 a 5,0% em peso, armazenado em recipientes cilíndricos. Os cilindros contêm aproximadamente 2,277 kg de UF_6 . O UF_6 à temperatura ambiente de 25°C apresenta-se na forma sólida. A Figura 2.5 mostra as etapas do processo de obtenção do pó de UO_2 .

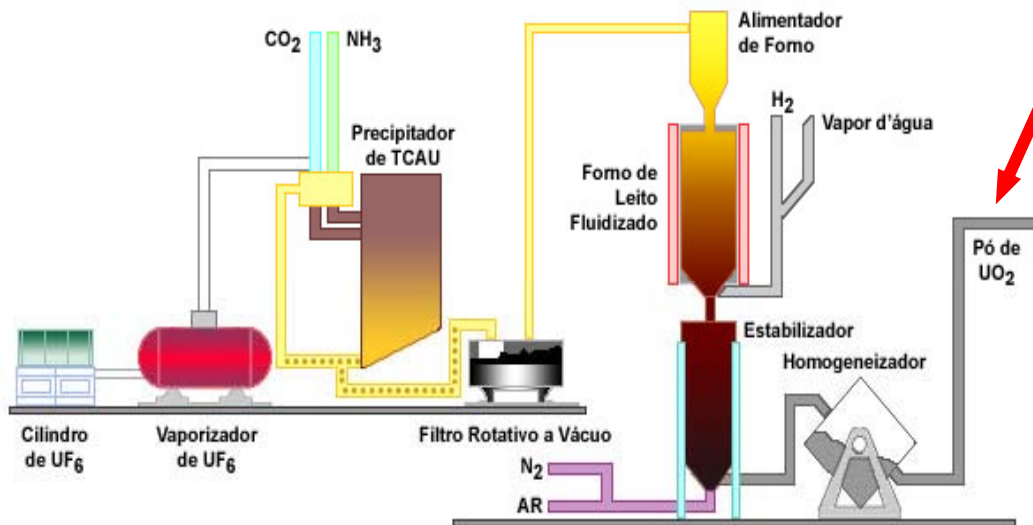


Figura 2.5: Processo de obtenção do pó de UO_2 .

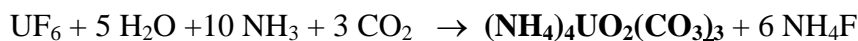
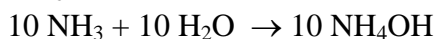
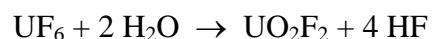
A fábrica FCN destina-se à produção do pó de dióxido de urânio (UO_2) através de processo por via úmida. A seguir apresentamos a descrição das etapas até a obtenção do pó de UO_2 .

2.3.1.1 – Vaporização do UF_6

Nesta etapa, o recipiente que contém UF_6 é introduzido no interior da autoclave. Conforme pode ser observado na Figura 2.2, o UF_6 é aquecido com vapor saturado até cerca de $100^\circ C$, onde o UF_6 é liquefeito. O vapor de UF_6 , acima da camada líquida, é então misturado a uma corrente, pré-aquecida a $100^\circ C$, de gás carbônico (CO_2) e amônia (NH_3).

2.3.1.2 – Precipitação do TCAU

A hidrólise do UF_6 e a precipitação do tricarbonato de amônio e uranila (TCAU) ocorrem em um reator químico despressurizado, com uma seção transversal retangular, onde o UF_6 reage com amônia (NH_3), gás carbônico (CO_2) e água (H_2O) desmineralizada. Esta reação química produz o tricarbonato de amônio e uranila (TCAU), sólido amarelo e insolúvel em água. As reações químicas para a obtenção do TCAU são as seguintes:



Terminada a precipitação, a suspensão é resfriada até a temperatura de 20°C para reduzir a concentração de urânio no filtrado. Depois de resfriada, a suspensão terá pH 9,0 (Santos, 1986).

2.3.1.3 – Filtro rotativo

O TCAU é bombeado para filtros rotativos a vácuo. O filtro é composto de um disco horizontal perfurado e de um raspador, cuja função é manter a torta de TCAU dentro de uma espessura segura quanto à criticalidade. Nesta etapa, são realizadas filtrações a vácuo, e o sobrenadante é enviado para o tratamento de efluentes, onde é feita a recuperação do urânio. O TCAU é seco e transportado para o circuito de redução química (Santos, 1986).

2.3.1.4 – Leito fluidizado

A decomposição térmica do TCAU e subsequente redução para UO_2 processa-se em forno de leito fluidizado com hidrogênio e vapor d'água a 600°C, sofrendo, então, uma redução química para UO_2 . O referido forno consiste em um reator vertical cilíndrico, possuindo, na parte inferior, um leito poroso e uma válvula de descarga. Na parte superior, possui dois bancos de filtros e um dispositivo dosador de TCAU. A redução é iniciada quando o TCAU recebe injeção de vapor d'água e hidrogênio.

2.3.1.5 – Estabilizador

Do forno de leito fluidizado, o pó quente de UO_2 é descarregado para dentro do vaso de passivação, situado abaixo do forno. Tal vaso apresenta seção cilíndrica, e possui uma barra absorvedora de carboneto de boro, para controle de criticalidade.

No estabilizador, o pó de UO_2 recebe a adição de N_2 gasoso, e as paredes são refrigeradas por mantas de água. Nessa etapa é utilizado N_2 , água de resfriamento e injeção de ar, para a temperatura não mais se elevar.

2.3.1.6 – Homogeinizador

O UO_2 é transportado para grandes recipientes giratórios (homogeinizadores), onde é adicionado o U_3O_8 . Após a estabilização, o pó de UO_2 é transferido do vaso de passivação (estabilizador) para tambores de armazenamento, e daí, pneumaticamente, para os misturadores e homogeneizadores que, mediante rotação, homogeneizam o pó de UO_2 . Os homogeneizadores são recipientes quadrados, com geometria anticrítica, com placas de cádmio para absorver os nêutrons.

A homogeneização é importante para favorecer a peletização com matéria-prima de propriedades mais constantes.

2.3.2 – FABRICAÇÃO DE PASTILHAS DE UO_2

Conforme mostra a Figura 2.6, a matéria-prima utilizada é o pó de UO_2 , produzido na fábrica de produção de pó de UO_2 , e cuja concentração isotópica, em ^{235}U , é da ordem de 0,71 a 5,0 % em peso.

Abaixo estão descritas as etapas até a obtenção das pastilhas de UO_2 .

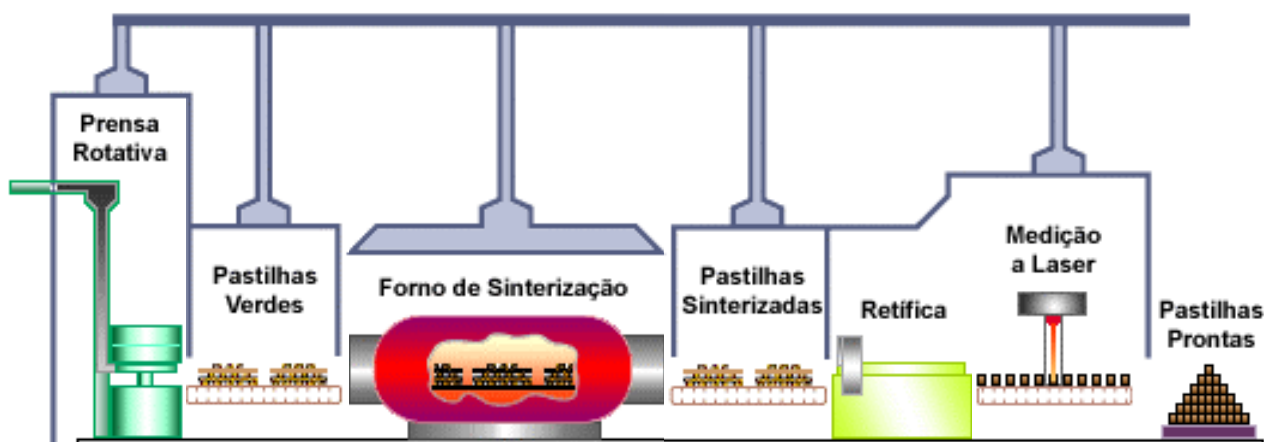


Figura 2.6: Fabricação de pastilhas de UO_2 .

2.3.2.1 – Prensa Rotativa

Após o processo de homogeneização entre o UO_2 e o U_3O_8 , e o peneiramento, a mistura é transportada pneumaticamente para uma prensa rotativa automática, onde são produzidas as pastilhas. O pó utilizado nesta etapa possui até $100\ \mu\text{m}$ de diâmetro. Nesta fase do processo, as pastilhas são chamadas de "pastilhas verdes". O pó com diâmetro maior que $100\ \mu\text{m}$ é levado para a estação de peneiramento, onde são

quebrados, novamente classificados e, posteriormente, reintroduzidos no homogeneizador.

2.3.2.2 – Forno de Sinterização

As "pastilhas verdes", ainda relativamente frágeis, são encaminhadas ao forno de sinterização, sob temperatura de 1.750°C, em processo semelhante ao da fabricação de cerâmicas, onde adquirem resistência necessária às condições de operação a que serão submetidas dentro do reator de uma usina nuclear. As pastilhas sinterizadas aprovadas são acondicionadas e armazenadas adequadamente.

2.3.2.3 – Retífica

O sistema de retificação de pastilhas de UO_2 é constituído por um dispositivo de alimentação contínua de pastilhas, um equipamento de retificação, uma seção de controle dimensional e inspeção visual e um dispositivo de retirada e arrumação de pastilhas. Para que sejam atendidas as exigências da especificação, todas as pastilhas sinterizadas sofrem uma retificação do diâmetro.

O material produzido na Fábrica será o UO_2 em pastilhas, em grau cerâmico nuclear. Tais pastilhas, após aprovação nos testes dimensionais, metalográficos e químicos pertinentes, estarão aptas a atender, como elementos combustíveis, às centrais nucleares do tipo PWR ou similares.

2.3.2.4 – Montagem do Elemento Combustível

O elemento combustível é um conjunto de 235 varetas, rigidamente posicionadas em uma estrutura metálica. As pastilhas de UO_2 são pesadas, arrumadas e secas em forno especial, e acomodadas dentro das varetas.

2.4 – AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE EXPOSIÇÃO NAS ETAPAS DO PROCESSO NA FÁBRICA DE COMBUSTÍVEL NUCLEAR (FCN)

O UO_2 e o U_3O_8 são compostos insolúveis em água, e conseqüentemente nos fluidos do corpo. Como esses compostos podem ser encontrados sob a forma de poeira na superfície e/ou no interior de peças e equipamentos que compõem a fábrica, a incorporação por inalação deve ser evitada utilizando-se máscaras descartáveis semi-faciais ou do tipo panorama. Na visita à instalação, observou-se que os operadores muitas vezes não obedecem às normas e procedimentos de proteção radiológica, que

requerem o uso de equipamentos de proteção física (EPI), como por exemplo o uso de máscara.

O UF₆ é considerado solúvel nos fluidos do corpo. Os trabalhadores expostos a esse composto, na autoclave, usam máscaras para evitar a incorporação por inalação. Em situações acidentais o trabalhador expõe-se aos produtos da hidrólise do UF₆ com a umidade do ar, que são o HF e o UO₂F₂, na forma de aerossol com diâmetro de 1 µm.

Estudos mostram que, para exposições agudas e crônicas de UO₂F₂, composto este solúvel, a toxidez química é predominantemente maior que a toxidez radiológica, considerando-se todos os graus de enriquecimento.

Quanto ao TCAU, sabe-se que é um composto pouco solúvel em água. Nesta, a solubilidade é 29,4 g/L (Santos, 1986). A literatura fornece poucos dados sobre esse composto.

Quando da nossa primeira visita à instalação, observou-se a presença adicional de TCAU sobre a proteção de acrílico do filtro rotativo, localizado em uma área de circulação, na qual quem trabalha na sala de operação, bem como os técnicos de proteção radiológica e os trabalhadores da manutenção, circulam livremente.

2.4.1 – FABRICAÇÃO DO PÓ DE UO₂

- **Área da autoclave (UF₆) e precipitação**

Essa área é toda automatizada. O trabalhador não permanece nesse espaço, e o mesmo grupo que trabalha na precipitação, trabalha na lavagem dos cilindros de UF₆. O risco ocorre na lavagem desses cilindros, ou após qualquer incidente que resulte escapamento do gás, ou ainda com o UF₆ na fase líquida. Os operadores entram na sala de alimentação de UF₆ durante o carregamento da autoclave. Os operadores utilizam máscaras com filtros para preservar a segurança.

- **Filtro rotativo**

A etapa crítica dessa parte do processo é quando o filtro rotativo é aberto para que o precipitado de TCAU seja “cortado, raspado”. Embora o filtro tenha uma tampa de acrílico, resíduos de TCAU permanecem em cima da tampa. Observa-se também que as espátulas utilizadas para cortar ou raspar o precipitado permanecem dentro de um recipiente aberto, propiciando a contaminação do ambiente.

- **Leito fluidizado**

Esta etapa é automatizada, controlada por computadores. Os trabalhadores da área da precipitação e do leito fluidizado permanecem na sala de controle e circulam na área onde o filtro rotativo (TCAU) está localizado. No leito fluidizado, após a redução química com H_2 , o operador retira o tambor que contém UO_2 e realiza a troca das mangueiras manualmente. Embora o trabalhador tenha que usar máscara facial, nessa etapa pode haver incorporação de UO_2 , devido ao resíduo de pó ao trocar as mangueiras.

- **Homogeneizador e peneiramento**

O UO_2 é transportado pneumaticamente para os homogeneizadores. Nesta etapa é adicionado U_3O_8 . A proporção é 90% de UO_2 e 10% de U_3O_8 . Nas salas de peneiramento e homogeneizadores, são utilizadas máscaras faciais completas (tipo panorama). O peneiramento recebe também lama da retífica, para que todo o UO_2 seja reaproveitado. Nesta etapa, o risco de incorporação é devido à inalação de poeira. Nesta etapa, os operadores utilizam máscaras panorâmicas com filtro para reduzir o risco de incorporação. Apenas uma pessoa trabalha no peneiramento, e usa máscara adequadamente, durante todo o tempo.

- **Prensa (90% de UO_2 e 10% de U_3O_8)**

O pó de UO_2 é transportado pneumaticamente dos homogeneizadores para a prensa. Nesta etapa do processo são produzidas pastilhas ainda frágeis. O operador pesa e mede o diâmetro da pastilha manualmente, porém usando luvas, conforme pôde ser observado, na ocasião de nossa visita à fábrica. Durante a visita, ocorreram problemas de entupimento do equipamento. Observou-se que o operador montava e desmontava a mangueira com a mão, para tentar desentupir o sistema.

A prensa tem uma proteção de acrílico para evitar dispersão do material no ambiente. Porém, periodicamente o trabalhador suga o pó que fica disperso no equipamento para voltar ao processo. Observou-se que quando ocorre problemas na máquina, o próprio trabalhador tenta fazer a manutenção inicial e retirar o pó de UO_2 , ou pedaço da pastilha, que entope a mangueira. Observou-se que, naquela ocasião, o trabalhador não usava máscara.

- **Forno de sinterização**

Nesta etapa as pastilhas de UO_2 são introduzidas no forno para serem sinterizadas à $1.750^\circ C$. O trabalhador coloca as pastilhas no carrinho, o qual é transportado por uma esteira para a retífica. Os operadores utilizam máscaras.

- **Retífica - UO_2**

A pastilha é retificada com água por trabalhadores devidamente protegidos com máscara semi-facial. A inspeção final da pastilha de UO_2 é feita manualmente, uma a uma. As pastilhas são então acondicionadas e enviadas à Unidade 1.

Todos os equipamentos potencialmente geradores de contaminação são enclausurados através de uma proteção em acrílico, para evitar a contaminação dos trabalhadores e do ambiente de trabalho. O uso de proteção respiratória, e a execução de uma rotina específica de monitoração e limpeza, são utilizados para obter níveis de incorporação sempre abaixo dos limites estabelecidos no regulamento técnico de proteção radiológica vigente no País (CNEN NN-3.01, 2005).

Os trabalhadores de manutenção poderão estar sujeitos à atmosfera e superfícies contendo níveis mais elevados de contaminação. Deste modo, todas as atividades de manutenção envolvem riscos radiológicos.

- **Laboratório de Apoio**

Neste laboratório são executados ensaios com as pastilhas de UO_2 , ensaios estes para determinar a densidade, porosidade, diâmetro, rugosidade e análise metalográfica. São realizados ensaios com o pó de UO_2 para determinar a granulometria, fluididez e densidade.

- **Laboratório Químico**

Neste laboratório são realizadas análises químicas do pó de UO_2 e da pastilha, e das amostras de efluentes. São realizadas análises de urânio, nitrogênio, carbono, fluoreto, cloreto e teor de urânio.

2.4.2 – FORMAS QUÍMICAS DO URÂNIO NA FABRICAÇÃO DO PÓ DE UO_2

Durante o processo de fabricação de pó de UO_2 e pastilhas, o urânio pode ser encontrado nas seguintes formas químicas:

- UF_6 - matéria prima para produção de UO_2 ;
- $(NH_4)_4UO_2(CO_3)_3$ - tricarbonato de amônio e uranila (TCAU);
- $(NH_4)_4UO_4(NO_3)_2$ - amônio peroxonitrouranato (APONU);
- UO_2 - produto básico do processo; e
- U_3O_8 - produto da reação de oxidação do UO_2 .

2.5 – PROPRIEDADES DO URÂNIO EM SISTEMAS FISIOLÓGICOS

As propriedades químicas dos complexos de urânio são diferentes das dos íons de urânio isoladamente. O urânio comporta-se diferentemente dos lantanídeos e actinídeos na corrente sanguínea. Isto porque a oxigenação do sangue leva à formação do íon uranila, UO_2^{+2} . A carga +2 faz com que ele tenha um comportamento biológico similar ao dos alcalinos terrosos, tais como cálcio, estrôncio e rádio. Devido à baixa afinidade com os componentes do sangue de alto peso molecular, o íon divalente é transferido rapidamente do sangue para os tecidos ou excretado (Anke e cols, 2004).

Os complexos formados entre o urânio e os íons de bicarbonato têm uma grande importância fisiológica. O complexo formado entre o U^{+6} e o bicarbonato é ultrafiltrável e pode atravessar membranas celulares. Tal complexo é, provavelmente, um dos responsáveis pelo transporte do urânio para a corrente sanguínea e, desta, para outros órgãos e tecidos. O complexo é estável em pH neutro, como no sangue, e não é muito reativo. O íon uranila em pH baixo, como o da urina, é mais reativo. Conseqüentemente, o rim torna-se um órgão afetado devido à toxicidade química do urânio (WHO, 2001).

O íon uranila também liga-se à transferrina, uma proteína plasmática responsável pelo transporte do ferro no sangue. Quando o urânio entra na corrente sanguínea, aproximadamente 40% dele liga-se a proteínas, e 60% a bicarbonatos (Scapolant e cols, 1998). A constante de estabilidade do complexo U^{+6} - bicarbonato é maior do que a do complexo U^{+6} - proteína. A formação de complexos fortes com os constituintes do sistema fisiológico de baixo peso molecular favorecerá a eliminação do U^{+6} da corrente sanguínea. O U^{+6} , uma vez presente no plasma, é captado em parte pelos ossos ou filtrado pelo glomérulo renal para a urina, enquanto que a outra parte retorna à circulação, através do fluido extracelular (Scapolant e cols, 1998; Anke e cols, 2004).

2.6 – MODELOS BIOCINÉTICOS

Para se estudar a incorporação de compostos radioativos, são utilizados modelos matemáticos biocinéticos que simulam a incorporação e a captação dos mesmos. No caso específico de indivíduos e trabalhadores expostos a radionuclídeos, a Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) tem publicado periodicamente modelos biocinéticos para a descrição dos casos de inalação, ingestão e contaminação através de ferimentos na pele.

Para o urânio, o modelo sistêmico mais recente está publicado na ICRP 67 (1994). O modelo do trato respiratório foi publicado na ICRP 66 (1994) e no Supporting Guidance 3 da ICRP (2003). O modelo do trato gastrointestinal foi publicado na ICRP 30 (1979), porém um novo modelo será publicado brevemente.

2.6.1 – MODELO DOSIMÉTRICO PULMONAR DA ICRP 66 (1994)

O modelo para dosimetria interna do pulmão foi apresentado na publicação 66 da Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP, 1994). Conforme esta publicação, o trato respiratório é dividido em cinco regiões: (1) a região extratorácica (ET), (2) as regiões torácicas bronquial (BB), (3) bronquiolar (bb), (4) alveolar-intersticial (AI) e (5) os nódulos linfáticos extratorácicos (LN_{ET}) e torácicos (LN_{TH}). Tal divisão baseia-se, principalmente, em considerações radiobiológicas, mas leva em conta também diferenças funcionais e na deposição de partículas. Considera também as características do processo de eliminação do material inalado nos diversos componentes do sistema respiratório. As regiões estão ilustradas na Figura 2.7.

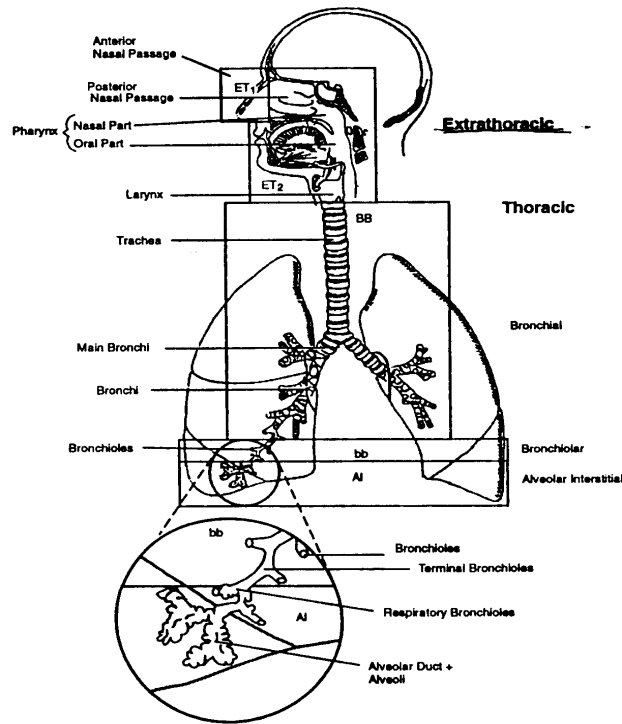


Figura 2.7: Representação esquemática do Sistema Respiratório da publicação 66 da ICRP (1994).

O modelo acima estabelece que, nas cinco regiões, há competição entre o processo de transporte mucociliar (em direção ao sistema gastrintestinal e aos nódulos linfáticos) e a absorção do material pelo sangue. O material depositado na parte mais externa da região extratorácica, denominada ET₁, é removido através de secreções nasais. Esse modelo pode ser observado na Figura 2.8.

MODELO SISTEMA RESPIRATÓRIO
(ICRP 66 – 1994)

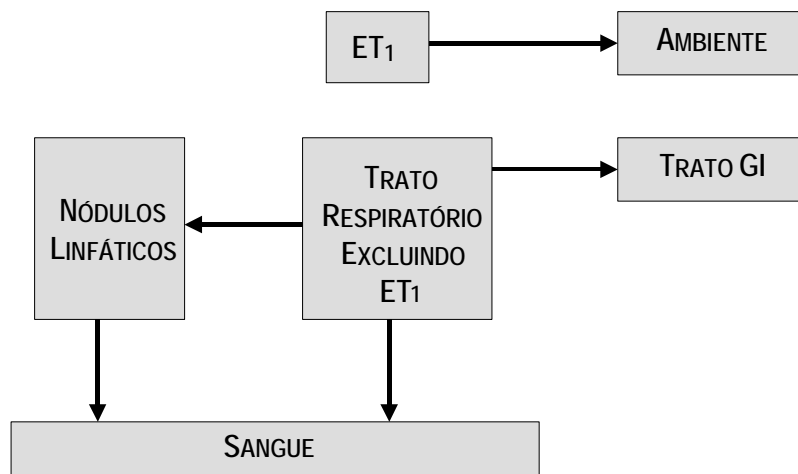


Figura 2.8: Modelo do Sistema Respiratório (ICRP 66, 1994).

2.6.1.1 – Deposição de partículas inaladas

As partículas inaladas são depositadas no tecido pulmonar como resultado de processos físicos, anatômicos e fisiológicos, que podem ocorrer durante qualquer parte do ciclo respiratório. Entre os fatores que afetam a deposição, destacam-se o diâmetro aerodinâmico, a forma, a higroscopicidade e a carga elétrica da partícula. Os fatores físicos determinam a extensão da sedimentação, impactação, difusão e precipitação eletrostática das partículas depositadas. A anatomia e a geometria do trato respiratório são importantes fatores biológicos que determinam os principais sítios de deposição. A deposição ocorre durante a inspiração e também pode ocorrer durante a expiração (WHO, 2001).

A deposição de partículas na região pulmonar não é aleatória, sendo influenciada por fatores físicos. Observou-se que a maior fração do material inalado é depositado próximo às bifurcações e entradas dos dutos alveolares (ICRP 66, 19994).

2.6.1.2 – Depuração das partículas radioativas inaladas

As partículas depositadas no trato respiratório são removidas pela competição de dois mecanismos de depuração: físico e dissolução-absorção. Tais mecanismos são responsáveis pela remoção das partículas depositadas, ou de seus constituintes, de todas as regiões do trato respiratório.

- **Depuração: Processo físico**

No processo físico, são removidas as partículas livres ou as que tenham sofrido fagocitose pelos macrófagos alveolares. As partículas depositadas no tapete mucociliar, que reveste as passagens nasais, são removidas do trato respiratório por batimento ciliar, que movimenta o muco em direção à parte oral da faringe, onde serão deglutidas. Alguns macrófagos permanecem nos alvéolos, outros entram no espaço intersticial entre os componentes da membrana respiratória, e, ainda, outros são eliminados pela via mucociliar. Algumas células fagocíticas migram da região pulmonar, mas esse processo ainda não está muito claro na literatura (Snipes, 1994; WHO, 2001).

- **Depuração: Dissolução-absorção**

No processo de dissolução, ocorre a dissociação dos constituintes das partículas. Para que esse processo ocorra, é necessário que haja a interação das partículas com as células e com os fluidos do corpo. Como resultado da dissolução, ou lixiviação da

partícula, ocorre a absorção, fenômeno de transporte que causa a transferência do material para os sistemas linfático e circulatório. O material absorvido pode ser transferido para outros órgãos, ou excretado via urina ou fezes. Células fagocíticas, principalmente os macrófagos, participam também do processo de dissolução. Alguns tipos de partículas são dissolvidas dentro dos fagossomos devido ao meio ácido das organelas. Contudo, algumas partículas dissolvidas podem permanecer associadas ao fagossomo, ou a outras organelas do macrófago, em vez de participar da difusão para fora dos macrófagos, para serem absorvidas e transportadas.

Como pôde ser visto, os processos de deposição e depuração de partículas no trato respiratório são muito complexos. O material pode ser transferido para o trato gastrintestinal, para os nódulos linfáticos ou permanecer retido nos tecidos. Após a absorção pelo sistema circulatório, os componentes dissolvidos das partículas radioativas podem ser redistribuídos para outros órgãos ou excretados via fezes ou urina.

De acordo com a publicação 66 da ICRP (1994), o processo de absorção dos compostos pelo sangue é composto de dois estágios, dependentes do tempo. O primeiro estágio é a dissociação das partículas em materiais que podem ser absorvidos no sangue (fluidos corporais), ou seja, a dissolução.

O segundo estágio é a absorção pelo sangue (*uptake*) das partículas que foram progressivamente dissociadas e dissolvidas.

O modelo compartimental mais simples que pode ser utilizado para representar a dissolução assume que uma fração se dissolve com relativa rapidez e uma fração significativa é absorvida lentamente, como resultado da ligação com componentes do trato respiratório (ICRP, 1994). A fração prontamente absorvida do material é denominada f_r e a taxa de dissolução na fase rápida s_r . A fração remanescente $(1 - f_r)$ dissolve-se mais lentamente, com taxa s_s . Desta forma, no caso de substâncias muito pouco solúveis, é importante acompanhar também a existência da fase rápida de absorção do particulado pelo sangue. O *uptake* pode usualmente ser tratado como ocorrendo instantaneamente. Em algumas situações, entretanto, uma fração do material dissolvido é absorvido mais lentamente, por causa da sua ligação com tecidos do sistema respiratório. Para representar este caso, o sistema respiratório inclui um compartimento no qual a atividade fica retida em cada região em um "estado ligado" (*bound state*) (ICRP, 1994).

- **Parâmetros de absorção**

A ICRP recomenda o uso de taxas de absorção específicas para compostos para os quais existem informações experimentais confiáveis. Para outras situações, são recomendados valores numéricos para os parâmetros de absorção (ICRP, 1994), de acordo com a classificação do tipo de absorção: rápida (tipo F), moderada (tipo M) ou lenta (tipo S). Os valores de referência para os parâmetros de absorção para os compostos tipos F, M e S encontram-se especificados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Valores de referência para os parâmetros de absorção para materiais dos tipos F, M ou S (ICRP, 1994).

Comportamento da absorção	F* (rápido)	M# (moderado)	S## (lento)
Fração dissolvida rapidamente (f_r)	1	0,1	0,001
Taxa da dissolução rápida s_r , d^{-1}	100	100	100
Taxa da dissolução lenta s_s , d^{-1}	-	0,005	0,0001

Na Tabela 2.2:

***F** refere-se aos materiais prontamente absorvidos pelo sangue. Há uma significativa absorção na região ET₂ – a parte mais interna da região extratorácica – e na região BB. Parte do material inalado permanecerá no muco até ser deglutido e não será absorvida pelo epitélio. Para tais materiais, a ICRP considera que, na ausência de dados experimentais específicos, $s_r = 100 d^{-1}$ ($t_{1/2} \cong 10$ min);

#**M** refere-se aos materiais com taxa intermediária de absorção. Para tais materiais, a percentagem rapidamente absorvida é da ordem de 10%, e o tempo de retenção na fase lenta é da ordem de 100 dias. Isto é representado por $f_r = 0,1$; $s_r = 100 d^{-1}$; $s_s = 0,005 d^{-1}$;

##**S** refere-se aos materiais relativamente insolúveis. A ICRP assume que, para esse tipo de material, a fração absorvida na fase rápida é igual a 0,1%. Para os 99,9% restantes, a taxa de absorção pelo sangue é $0,0001 d^{-1}$. Isto é representado por $f_r = 0,001$; $s_r = 100 d^{-1}$; $s_s = 0,0001 d^{-1}$.

- **Solubilidade e excreção**

Baseado no modelo acima, a inalação de um composto solúvel, como por exemplo o UF₆, que é rapidamente transferido para o sangue, resulta uma atividade maior na excreção urinária, comparada à excreção fecal. Por conseguinte, a análise de urina

fornecerá uma informação mais significativa para o cálculo da atividade incorporada. A concentração de urânio nas fezes indica que houve deglutição do material depositado no muco do trato respiratório.

A inalação de um composto como o TCAU, que apresenta solubilidade na ordem de 120g/L em água, deverá, de acordo com o modelo proposto, resultar em uma concentração de urânio na urina aumentada, maior do que normalmente se encontra na urina dos trabalhadores que manipulam substâncias insolúveis. A concentração de urânio nas fezes indica que houve deglutição do muco.

Quando ocorre a inalação de compostos pouco solúveis, como UO_2 e U_3O_8 , a retenção no trato respiratório é prolongada. Apenas uma pequena fração (0,1%) é transferida para o sangue rapidamente (Tabela 2.2). Espera-se encontrar uma atividade maior na excreção fecal, comparada à excreção urinária. Nesta situação, é recomendável que seja realizada análise de urina e fezes.

A ICRP (1994) recomenda que sejam utilizados valores específicos sempre que existirem informações confiáveis para os compostos que estão sendo analisados.

O HRTM (*Human Respiratory Tract Model*) foi especificamente projetado para permitir o uso das características de solubilidade específica do material, bem como dos parâmetros f_r , s_r e s_s padronizados pela ICRP. Ele também auxilia na interpretação dos dados de bioanálise (Stather, 2004; ICRP, 2003).

Ansoborlo e colaboradores (2002), entre 1990 e 1999, realizaram experimentos *in vitro* e *in vivo* utilizando UO_2 produzido em diferentes fábricas da França, por diferentes processos, com diferentes quantidades de impurezas ou com compostos puros. Determinaram parâmetros específicos como o DAMA, área superficial, e os que definem a absorção no sangue (f_r , f_r , s_r e s_s), conforme recomendado pela publicação 66 da ICRP (1994). No referido trabalho, a estimativa do tipo de absorção do UO_2 e do coeficiente de dose baseou-se em estudos *in vivo*. Preferiu-se utilizar compostos puros, devido à complexidade e à influência das impurezas na análise dos dados. Verificaram que, devido a fatores tais como a presença de impurezas, a influência do processo de fabricação, a área específica do particulado e o DAMA, é importante determinar as características do composto manipulado na fábrica (Ansoborlo e cols, 2002).

A Tabela 2.3 mostra os parâmetros específicos para UO_2 derivados a partir dos experimentos *in vitro* e *in vivo* realizados com o UO_2 produzido nas diferentes fábricas da França. Os valores dos parâmetros de absorção sangüínea (f_r , s_r e s_s) variam muito entre si, conforme a fábrica, os métodos de obtenção e a presença de impurezas.

Tabela 2.3: Parâmetros específicos para UO₂ derivados a partir de experimentos *in vitro* e *in vivo* (Ansoborlo e cols, 1998; Ansoborlo e cols, 2002; Cazel e cols, 2001).

UO ₂	Método	f _r	s _s	s _r
COGEMA	<i>in vitro</i>	0,02	1,26	0,00059
	<i>in vivo</i>	0,03	1,25	0,0015
COMURHEX	<i>in vitro</i>	0,04	0,39	0,00006
	<i>in vivo</i>	0,0004	0,0001	0,00013
FBFC (Retífica)	<i>in vitro</i>	0,01	N.D	0,00049
	<i>in vivo</i>	0,002	0,002	0,00015
FBFC (Conversão)	<i>in vitro</i>	0,01	N.D.	0,00058
	<i>in vivo</i>			
UO ₂ (impuro)				
CEA	<i>in vitro</i>	0,19	0,47	0,0044
UO ₂ , U ₃ O ₈ , UO ₃ , FeO, Fe ₂ U	<i>in vivo</i>	0,12	1,45	0,0026
FBFC Peletização 5 a 10% U ₃ O ₈	<i>in vitro</i>	0,01	0,005	0,00014
	<i>in vivo</i>	ND	ND	0,00054
FBFC Conversão 5 a 10% U ₃ O ₈	<i>in vitro</i>	0,002	0,002	0,00015
	<i>in vivo</i>	ND	ND	0,00058

ND- não determinado

Em particular para o urânio, a publicação *Guide for the Practical Application of the ICRP Human Respiratory Tract Model* (ICRP, 2003) exemplifica parâmetros específicos de absorção para o UO₂, diferentes do tipo S padrão sugerido nas publicações 68 e 71 (ICRP, 1995; 1996). Na referida publicação, o UO₂ é considerado como um composto com parâmetros de absorção mais semelhantes aos definidos para o tipo M. Tais parâmetros foram definidos a partir de experimentos *in vivo* realizados com ratos e com a mistura de óxidos (MOX) na forma de (U,Pu)O₂. Este composto foi obtido a partir da precipitação do diuranato de amônia (DUA), ou U₂O₇(NH₄)₂, utilizando-se o nitrato de uranila depletado, seguido da calcinação em U₃O₈ e da redução em UO₂ (Ansoborlo e cols, 1997; Ansoborlo e cols, 1998; Cazel e cols, 2001). Os parâmetros exemplificados na publicação *Guide for the Practical Application of the ICRP Human Respiratory Tract Model* são f_r = 0,03, s_r = 1,25, s_s = 1,5 x 10⁻³ e o coeficiente de dose = 3,7 μSvBq⁻¹. Como o coeficiente de dose está entre os parâmetros padrões Tipo S e Tipo M, a ICRP (2003) sugere que seja utilizado o f₁ do composto tipo M padrão. Esses valores estão apresentados na Tabela 2.3 e foram derivados de experimentos *in vivo* realizados com o óxido produzido na COGEMA. Esses dados estão indicados com a nomenclatura ICRP 2003 na Tabela 2.5.

Tabela 2.4: Média dos parâmetros específicos para UO_2 derivados a partir de experimentos *in vivo* (Ansoborlo e cols, 1998; Ansoborlo e cols, 2002; Cazel e cols, 2001).

UO_2 (puro) (F)	Método	f_r	s_s	s_r
Stradling e cols (2002)	<i>in vivo</i>	0,016	1,25	0,00086

Stradling e cols (2002) estimaram a média dos valores obtidos nos experimentos *in vivo* realizados por Ansoborlo e cols (2002) – (Tabela 2.4) – e sugeriram, para os parâmetros de absorção, os valores $f_r = 0,02$; $s_r = 1,3$ e $s_s = 8,6 \times 10^{-4}$, e o valor de f_1 como sendo o de um composto do tipo S (Stradling e cols, 2002). Estes dados estão indicados na Tabela 2.5 com a nomenclatura UO_2 (F). Stradling e cols (2002) mostram ainda os parâmetros derivados de experimentos *in vivo* realizados no *National Radiological Protection Board* (NRPB), utilizando UO_2 produzido por indústrias do Reino Unido (Hodgson, 2001; Stradling e cols, 2002). Nesse caso, utilizou-se a nomenclatura UO_2 (UK) para os parâmetros derivados a partir de experimentos *in vivo* com UO_2 puro e UO_2 (UK₂) quando o UO_2 utilizado no experimento estava na forma de cerâmica (sinterizado), como mostra a Tabela 2.5.

Tabela 2.5: Parâmetros específicos para o UO_2 derivados de experimentos *in vitro* e *in vivo*.

Material	f_r	s_r	s_s	F_1
ICRP 2003	0,03	1,25	1,5 e-3	0,02
UO_2 (UK) não cerâmica	0,01	0,95	6,1 e-4	0,002
UO_2 (F)	0,02	1,3	8,6 e-4	0,002
UO_2 (UK ₂) cerâmica	0,01	1,3	2,6 e-4	0,002

Tanto nos parâmetros derivados dos experimentos *in vivo* realizados pelo *Institute de Protection et de Sureté Nucleare* (IPSN), na França, quanto no trabalho realizado pelo NRPB, os valores de s_r são menores do que o sugerido pela ICRP como padrão para compostos do tipo S. Os valores de f_r e s_s são intermediários entre os de compostos do tipo M e S padrões.

2.6.2 – MODELOS DO TRATO GASTRINTESTINAL

No modelo do sistema gastrointestinal adotado pela ICRP em sua publicação 30 (1979), o sistema é dividido em quatro compartimentos: (1) estômago (ES); (2) intestino delgado (ID); (3) intestino grosso superior (IGS); e (4) intestino grosso inferior (IGI).

Os tempos de residência médios nos compartimentos são de 1 hora no estômago (ES); 4 horas no intestino delgado (ID); 13 horas no intestino grosso superior (IGS); e 24 horas no intestino grosso inferior (IGI).

De acordo com esse modelo, o radionuclídeo pode ser depositado no estômago durante a ingestão ou através da remoção mucociliar do particulado depositado no sistema respiratório, e transportado para o sistema gastrointestinal. A ICRP 30 (1979) assume que a absorção para os fluidos do corpo ocorre apenas no intestino delgado. A fração da atividade do radionuclídeo que atinge os fluidos do corpo é chamada f_i . Esta depende da solubilidade do composto. Se f_i for igual a 1, significa que a absorção para os fluidos é completa, assumindo-se, neste caso, que o radionuclídeo passa diretamente do intestino para o compartimento de transferência. Quanto mais insolúvel, menores são os valores para f_i , e conseqüentemente maior a excreção via fezes.

O esquema do modelo do sistema gastrointestinal está representado na Figura 2.9.

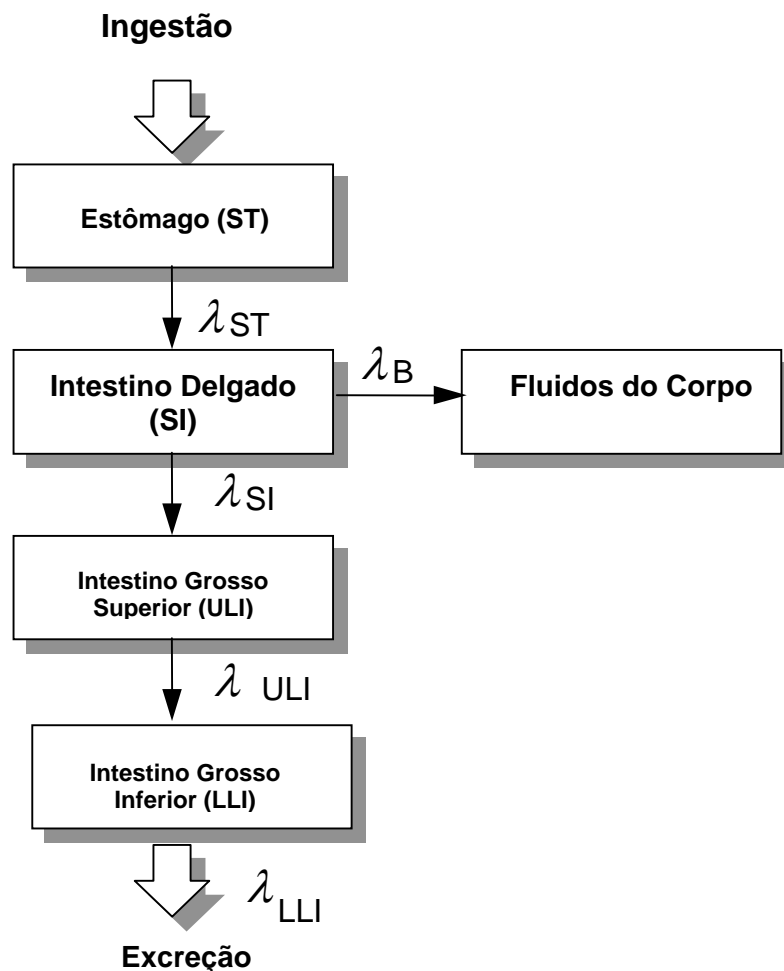


Figura 2.9: Modelo do Sistema gastrointestinal adotado na publicação 30 da ICRP (1979).

Segundo o modelo acima, a absorção de compostos solúveis, ou seja, a transferência do intestino para o sangue, é de 2% ($f_1 = 0,02$). Esse valor de f_1 se aplica para UF_6 , UO_2F_2 e $UO_2(NO_3)_2$. Para compostos considerados insolúveis, como UO_2 e U_3O_8 , a absorção é de 0,2% ($f_1 = 0,002$).

2.6.3 – MODELOS SISTÊMICOS DO URÂNIO

O modelo sistêmico representa a distribuição, retenção e excreção do radionuclídeo no corpo, a partir do sangue. Na última década, a ICRP vem se preocupando em desenvolver modelos que descrevam de maneira mais realística a distribuição e retenção de radionuclídeos no corpo.

A biocinética dos radionuclídeos no corpo são descritas por equações diferenciais de primeira ordem. Estas formam a base para o método de cálculo empregado para derivar as tabelas com os valores de retenção e excreção fracional. As tabelas geradas permitem o cálculo da atividade incorporada a partir dos resultados de medidas de excreta, de órgãos ou de corpo inteiro.

O modelo sistêmico para o urânio, adotado pela ICRP na publicação 69 (1994), é baseado nos processos fisiológicos do corpo e representa de maneira realista o metabolismo do urânio no corpo. Após a incorporação do urânio, seja por inalação ou ingestão, a atividade presente no sangue é distribuída no corpo. O modelo inclui os seguintes órgãos e tecidos:

- Tecido ósseo;
- Fígado;
- Tecido mole; e
- Rins.

O tecido mole é representado por três compartimentos (STO, ST1 e ST2). O compartimento STO representa o fluido extracelular. Este compartimento recebe 30% da atividade do plasma, com meia-vida de 2 horas. Os compartimentos ST1 e ST2 representam a retenção imediata e lenta nos tecidos moles (ST1 representa músculos, pele, tecidos adiposo e subcutâneo) e ST2 representa todos os demais tecidos moles do corpo).

Da atividade de urânio presente no plasma, 6,65% é depositada no compartimento ST1, com meia-vida biológica de 20 dias. Cerca de 0,3% da atividade do plasma é depositada no compartimento ST2 e fica retida com meia-vida de 100 anos.

O tecido ósseo é dividido em quatro compartimentos (superfície do osso trabecular; superfície do osso cortical; volume do osso trabecular; e volume do osso cortical). A superfície do tecido ósseo recebe 15% da atividade do plasma, e permanece com meia-vida de 5 dias. Metade da atividade que deixa a superfície óssea retorna ao plasma. A outra metade deposita-se no compartimento chamado volume do *osso trocável*, ficando retido com meia-vida de 30 dias. Da atividade de urânio que deixa esse compartimento, 75% retorna para a superfície óssea, e 25% fica retida no compartimento do volume do *osso trocável*.

O fígado é dividido em dois compartimentos: “fígado 1” e “fígado 2”. O “fígado 1” recebe 1,5% do urânio do plasma, o qual permanece neste compartimento com meia-vida de 7 dias. Da atividade de urânio que deixa esse compartimento, 93% retorna para o plasma e 7% é transferido para o compartimento “fígado 2”, que retorna ao plasma com meia-vida biológica de 10 anos. A excreção urinária é decorrente da transferência direta do plasma para a bexiga e também do urânio transferido para a bexiga após a retenção temporária nos tubos renais.

Outro compartimento que compõe o modelo sistêmico do urânio é o tecido renal, que recebe 0,05% da atividade do plasma, cuja meia-vida biológica é de 5 anos. O modelo sistêmico para o urânio está apresentado na Figura 2.10. A incorporação de compostos de urânio pode ser limitada pela toxidez química. O valor limite é 0,25 mg. A limitação para a incorporação de compostos solúveis de urânio considera a toxidez química e não a radiológica, devido ao dano causado nos túbulos glomerulares.

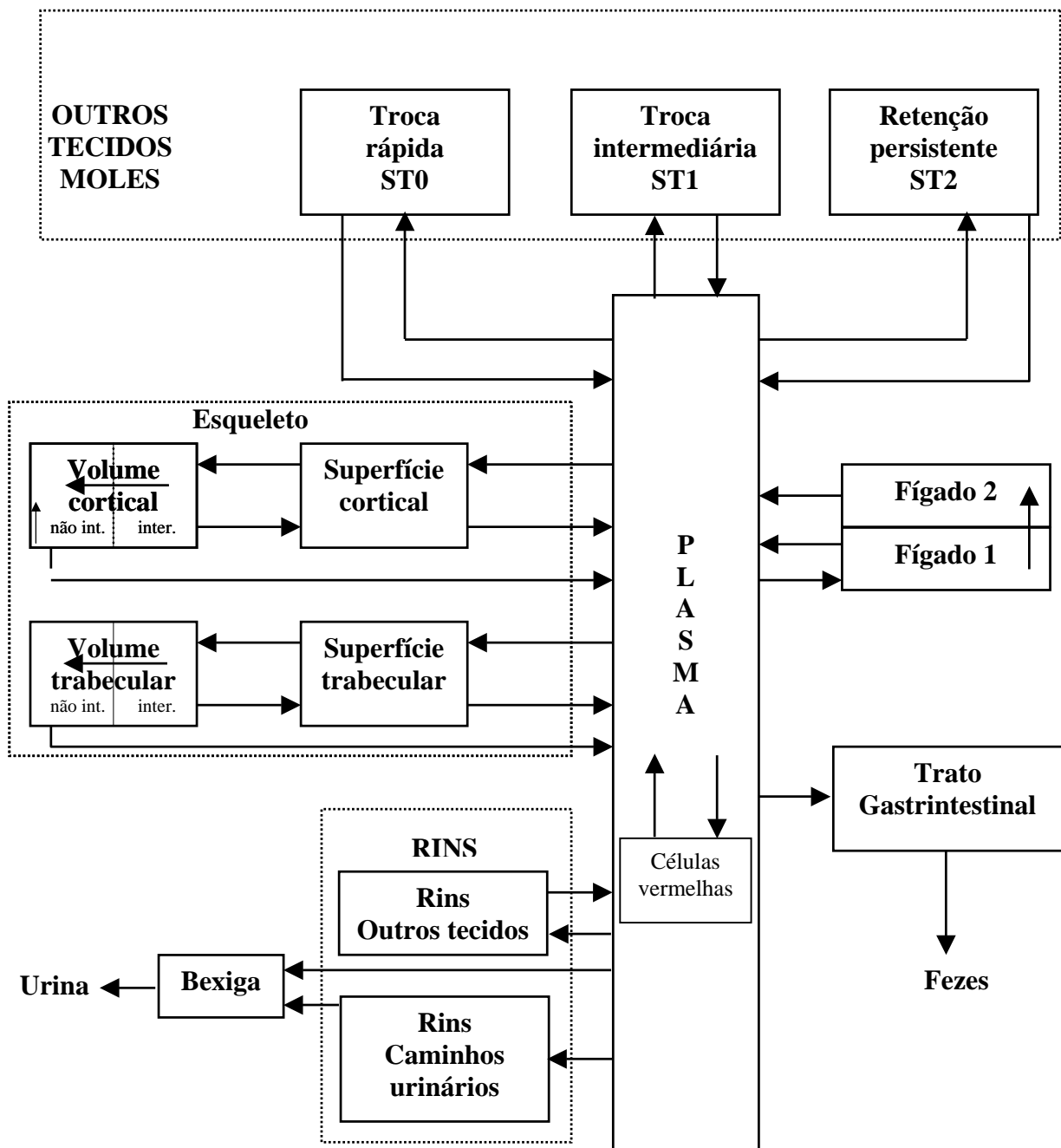


Figura 2.10: Esquema do modelo sistêmico para o urânio adotado pela ICRP 67 (1994).

2.7 – MONITORAÇÃO DE URÂNIO POR BIOANÁLISE

A monitoração individual para avaliar a dose comprometida devido à incorporação de radionuclídeos pode ser executada com base nos procedimentos de bioanálise *in vitro* e *in vivo*.

A bioanálise *in vivo* consiste na determinação da atividade de radionuclídeos no corpo todo ou em órgãos específicos, através da medida de raios gama ou X emitidos, permitindo estimar o conteúdo de um determinado radionuclídeo no instante da medida. Esta técnica consiste, basicamente, no posicionamento de detectores próximo ao corpo e aquisição do espectro em função do tempo e do tipo de medida. Para trabalhadores expostos a urânio enriquecido é realizada a medida direta de ^{235}U . A medida é realizada através do detector de Germânio Hiperpuro (HPGe) com eletrônica associada, a geometria de contagem utilizada é pulmão e o tempo de medida é de 60 minutos.

A bioanálise *in vitro* é um método indireto de avaliação da incorporação, através da determinação da concentração de radionuclídeos em amostras biológicas. As principais fontes de dados de bioanálise *in vitro* são normalmente: fezes, urina, ar exalado e sangue, embora outras fontes como cabelo, dentes e esfregaços do nariz possam ser empregados em casos especiais (IAEA Safety Series, 1999; Schmitzer e cols, 2003).

A escolha da amostra biológica mais apropriada depende da principal via de excreção do radionuclídeo em questão, assim como também de fatores tais como facilidade de coleta, análise e interpretação. Em geral, amostras de urina são mais fáceis de serem coletadas e são utilizadas como base para a determinação da incorporação de materiais que são prontamente absorvidos, e para estimar os níveis da atividade sistêmica nos tecidos do corpo. A incorporação de materiais insolúveis ou pouco absorvidos, seja por inalação ou por ingestão, pode ser confirmada através da análise de amostras de fezes (IAEA Safety Series, 1999).

Na bioanálise *in vitro*, as amostras de urina e fezes são analisadas utilizando procedimentos radioquímicos para reduzir os diferentes tipos de matriz e para realizar as separações químicas, com a finalidade de disponibilizar o radionuclídeo a ser medido.

2.7.1 – AMOSTRAS DE URINA

A urina é composta de resíduos metabólicos, eletrólitos e principalmente água, resultante da filtração do sangue pelos rins. Permanece armazenada na bexiga por um período de algumas horas antes de ser excretada. A excreção urinária do homem padrão

é 1,6L para o sexo masculino e 1,2 L para o feminino. Porém, isso depende das condições fisiológicas e ambientais (ICRP 89, 2003). Como existe uma variação diurna na excreção de muitos materiais, de forma geral é necessário a coleta de uma excreção diária completa (IAEA Safety Series, 1999; Karpas, 2001).

A monitoração individual de trabalhadores expostos a compostos de urânio exige uma metodologia capaz de detectar baixos níveis de atividade nas excreções. Isso é importante porque compostos inalados cujas taxas de dissolução sejam lentas fornecem excreção muito baixa na urina. Por outro lado, a medida do radionuclídeo na urina é um dos métodos que permite monitorar trabalhadores e fornecer informações radiométricas relevantes com sensibilidade correspondente aos limites de dose ocupacionais (Baglan e cols, 1999; Schmitzer e cols, 2003).

Após a incorporação, os compostos de urânio podem ligar-se a diferentes ligantes orgânicos ou inorgânicos, até a excreção. Ao seguir o protocolo de preparação das amostras de urina, a influência da forma química do urânio na análise torna-se desprezível. Portanto, não existe diferença entre o composto de urânio incorporado e o metabolizado, ao ser analisado (Baglan e cols, 1999).

Existem três técnicas disponíveis para a determinação de urânio em urina. São elas: espectrometria alfa, fluorimetria e espectrometria de massa. A técnica que tem sido utilizada há muitas décadas na determinação da atividade de emissores alfa é a espectrometria alfa. Esta possui um limite mínimo detectável de aproximadamente 1 mBq/L de urina, ou 1 mBq/g de cinzas. Com essa metodologia é possível determinar as razões isotópicas entre o ^{234}U e o ^{238}U , e entre o ^{234}U e o ^{235}U (Julião e cols, 2003; Schmitzer e cols, 2003).

Como os modelos biocinéticos e dosimétricos existentes na literatura estimam a incorporação através da excreção diária (24 h), é necessário que a coleta seja realizada no período de 24 horas. No caso da análise de urânio em amostras de urina por espectrometria alfa, é necessário que todo esse volume seja analisado, com a finalidade de aumentar a sensibilidade da técnica. Para atingir um limite de detecção mais baixo, na ordem de 0,1 mBq, é necessário deixar a amostra contando durante 600.000 segundos sob vácuo (Schmitzer e cols, 2003).

Em análises de urânio natural, urânio enriquecido ou depletado em amostras de urina, quando a atividade do ^{238}U é menor que o limite de detecção apresentado na espectrometria alfa, pode-se utilizar a espectrometria de massa para avaliar a massa ^{238}U na urina e, também, a toxicidade química do urânio (Stradling e cols, 2002).

A espectrometria de massa (ICP-MS) permite a análise da maioria dos elementos da Tabela Periódica, e possui sensibilidade e reprodutibilidade para determinar ^{238}U em amostras biológicas. O ICP-MS possibilita uma análise simples e rápida da concentração de urânio em urina, com um limite de detecção que varia de 1 a 10 ng/L, conforme o modelo do equipamento. A técnica possui alta sensibilidade para determinar urânio em amostras de urina de pessoas ocupacionalmente expostas, e permite analisar também amostras de pessoas não expostas. Para a análise, é necessário apenas uma alíquota da amostra (0,5 ml), ácido nítrico suprapuro e adição de padrão interno (Baglan e cols, 1999; Schmitzer e cols, 2003; Karpas e cols, 2005).

Algumas formas químicas presentes na urina, tais como bicarbonato e substratos biológicos, podem ser degradados com a amostra. Além disso, o radionuclídeo de interesse pode ser absorvido na superfície de recipientes. Por essas razões, as amostras devem ser estabilizadas até a sua análise por refrigeração, ou pela adição de ácido ou outro preservativo apropriado (ácido sulfâmico).

2.7.2 – AMOSTRAS DE FEZES

As amostras de fezes contêm material liberado dos pulmões, material sistêmico excretado no sistema gastrointestinal – principalmente a bile – e material não absorvido pelo sistema gastrointestinal após a ingestão. O tempo de trânsito nominal do material pelo sistema gastrointestinal é cerca de dois dias, mas é dependente da dieta e da saúde do indivíduo. Além disso, a massa e a composição fecal são muito variáveis.

As amostras de fezes são ricas em substratos biológicos e, particularmente, sujeitas à biodegradação. Portanto, elas devem ser prontamente analisadas ou preservadas, por congelamento. Amostras de fezes podem conter níveis significantes de contaminantes biológicos potencialmente tóxicos.

2.8 – FATORES QUE PODEM INFLUENCIAR A INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DA BIOANÁLISE *IN VITRO*

A solubilidade do composto influencia diretamente a taxa de excreção urinária e fecal do radionuclídeo. Quanto maior a solubilidade do composto, mais facilmente ele será absorvido pelos fluidos do corpo, distribuindo-se pelos órgãos e tecidos, e maior será a eliminação através da urina. Quanto menor a solubilidade, menor será a taxa de absorção para o sangue, conseqüentemente diminui a excreção urinária do radionuclídeo e aumenta

a sua excreção fecal, isto se aplica tanto para casos de incorporação por ingestão como por inalação (Roth e cols, 2001).

A taxa de dissolução do aerossol é um parâmetro importante para se quantificar a transferência do radionuclídeo do pulmão para outros órgãos, e para se calcular as doses devido à incorporação de radionuclídeos (ICRP, 1994)).

De acordo com o modelo do sistema respiratório da ICRP, publicação 66 (ICRP, 1994), a absorção do radionuclídeo para o sangue é um processo de duas etapas: absorção rápida para o sangue, que ocorre imediatamente após a inalação; e uma outra etapa cuja absorção para o sangue é mais lenta, e varia de acordo com a solubilidade do composto. A ICRP, publicação 66 (ICRP, 1994) classifica os compostos em três tipos de absorção:

- **Tipo F** - que representa os compostos solúveis, 100% é transferido do pulmão para o sangue com uma meia-vida de 10 minutos. Para estes compostos espera-se encontrar uma fração do radionuclídeo na excreção urinária muito maior que na excreção fecal. No primeiro dia após a incorporação única de 1 Bq/dia de urânio, DAMA=1 μ m, espera-se encontrar na urina uma fração de 0,16 da atividade incorporada; e nas fezes uma fração de 0,03 da atividade incorporada.
- **Tipo M** - que representa os compostos menos insolúveis, 10% é transferido do pulmão para o sangue com uma meia-vida de 10 minutos e 90% com uma meia-vida de aproximadamente 140 dias. Para estes compostos espera-se encontrar uma fração do radionuclídeo na excreção fecal maior que na excreção urinária. No primeiro dia após a incorporação única de 1 Bq/dia de urânio, DAMA=1 μ m, espera-se encontrar na urina uma fração de 0,02 da atividade incorporada; e nas fezes uma fração de 0,06 da atividade incorporada.
- **Tipo S** - que representa os compostos insolúveis, 0,1% é transferido do pulmão para o sangue com uma meia-vida de 10 minutos e 99,9% com uma meia-vida de aproximadamente 6930 dias. Para estes compostos espera-se encontrar uma fração do radionuclídeo na excreção fecal maior que na excreção urinária, sendo a excreção urinária muito menor comparado ao que seria para o composto Tipo M. No primeiro dia após a incorporação única de 1 Bq/dia de urânio, DAMA=1 μ m, espera-se

encontrar na urina uma fração de 0,0004 da atividade incorporada; e nas fezes uma fração de 0,06 da atividade incorporada.

A nova publicação da ICRP para o sistema respiratório “Supporting Guidance” (ICRP, 2003), recomenda o uso de parâmetros específicos para cada composto ao invés dos parâmetros de referência da ICRP publicação 66 (ICRP, 1994), mas somente quando estes são bem conhecidos. Esta nova publicação da ICRP sugere os seguintes parâmetros de retenção para o UO_2 : 3% é transferido do pulmão para o sangue com uma meia-vida de 792 minutos (0.55 dia) e 97% com uma meia-vida de aproximadamente 462 dias. Para estes compostos espera-se encontrar uma fração do radionuclídeo na excreção fecal maior que na excreção urinária. No primeiro dia após a incorporação única de 1 Bq/dia de urânio, DAMA=1 μ m, espera-se encontrar na urina uma fração de 0,0045 da atividade incorporada; e nas fezes uma fração de 0,06 da atividade incorporada.

2.9 – EXPOSIÇÃO AMBIENTAL AO URÂNIO

O urânio ocorre naturalmente na natureza. Pequenas quantidades são encontradas no ar inalado, na água e nos alimentos que são regularmente consumidos pelos seres humanos. O urânio está presente na urina como consequência da exposição ambiental, via dieta alimentar e via inalação (Li e cols, 2005).

A principal via de entrada de urânio no corpo humano é a ingestão de alimentos e água. A atividade de urânio natural presente nos alimentos situa-se entre 10 e 200 mBq por kg de vegetais frescos, cereais e peixe. Segundo Roth e colaboradores (2001), alguns tipos de água mineral também contém urânio natural, com concentração em atividade entre 0,001 e 500 mBq/L. A atividade média diária incorporada em diferentes países tem sido analisada em vários estudos (Roth e cols, 2001).

Segundo o Comitê Científico das Nações Unidas para Avaliação dos Efeitos da Radiação Atômica (UNSCEAR, 2000), o valor de referência mundial para incorporação anual de urânio, para um indivíduo adulto, é 5,7 Bq devido à ingestão de alimentos sólidos e líquidos.

A Tabela 2.6 mostra a incorporação anual de ^{238}U através da dieta alimentar, cujos dados foram apresentados pela América do Norte, Ásia e Europa na publicação do UNSCEAR (2000).

Tabela 2.6: Incorporação anual de ^{238}U pela dieta alimentar (UNSCEAR, 2000).

Continente	Países	Incorporação anual de ^{238}U (Bq)
América do Norte	Estados Unidos	5,5 – 6,2
	China	57,0
Ásia	Índia	2,9
	Japão	3,2-6,6
	França	4,4
	Alemanha	11,0
Europa	Polônia	6,4
	Romênia	5,8
	Rússia	16,0
	Reino Unido	4,4

A incorporação diária dos habitantes da cidade do Rio de Janeiro devido ao consumo de água, leite e vegetais é de aproximadamente 12 mBq de ^{238}U (Santos e cols, 2002). Esse valor corresponde à incorporação anual de 4,4 Bq, o que está de acordo com os valores internacionais citados no documento do Comitê Científico das Nações Unidas para Avaliação dos Efeitos da Radiação Atômica (UNSCEAR, 2000).

2.9.1 – EXCREÇÃO NATURAL DE URÂNIO NA URINA

Segundo Roth, o nível do urânio na excreção urinária diária varia consideravelmente, e os valores seguem uma distribuição gaussiana (Roth e cols, 2001). Os valores disponíveis na literatura ficam limitados devido à atividade de urânio na urina ser da ordem de ng, o que torna difícil a sua detecção.

De acordo com a publicação 23 da ICRP (1975), a excreção renal de ^{238}U em pessoas não ocupacionalmente expostas pode variar de 600 a 6.000 μBq (49 a 490 ng de ^{238}U) por dia. Roth e colaboradores (2001) encontraram, na maioria dos dados, valores menores que 49 ng/dia. Tais valores estão de acordo com os encontrados em estudos indianos (12,2 ng/dia), o que corresponde a 0,0128 $\mu\text{g/L}$ (Dang e cols, 1992; WHO, 2001). Medley e colaboradores (1994) observaram valores entre 0,004 e 0,057 $\mu\text{g/L}$ de urânio na urina.

Karpas e cols (1996) e Dang e cols (1992) encontraram valores similares aos valores encontrados no estudo NHANES (*National Health and Nutrition Examination Survey*), realizado com um grupo da população dos EUA (NCEH, 2003). Nesse estudo,

25% dos valores foram menores que o limite de detecção (0,003 µg/L). Valores menores que 1 µg/L foram encontrados nos trabalhos de Hamilton e cols (1994) e em 98% das análises apresentadas no trabalho de Hiller e colaboradores (2000).

Segundo Byrne e colaboradores (1991), a média de aproximadamente 10 ng/L encontrada no estudo por eles realizada corresponde ao valor esperado como consequência da incorporação devido à dieta alimentar.

Dados experimentais analisados por Werner e colaboradores (2003), cerca de 1.000 pessoas não expostas, residentes na Alemanha, Itália e Grã-Bretanha, mostram excreção urinária diária média de 20 ng para homens e 16,7 ng para mulheres. Estão de acordo com o trabalho realizado por Li e colaboradores (2005), que encontrou excreção diária de 20 ng de urânio.

O Quadro 2.1 resume os principais dados sobre a excreção urinária natural de urânio (^{238}U) encontrados na literatura.

Quadro 2.1: Concentração de urânio (^{238}U) na urina de habitantes não ocupacionalmente expostos apresentados na literatura.

Excreção urinária natural de ^{238}U				
Referência	Média aritmética	Intervalo	Média geométrica	Obs.:
Dang (1992)	12,8 ng/L		(9,4±2,2) ng/L	
Li (2005)	20 ng/d			
Medley (1994)		0,004 a 0,057 µg/L		
NCEH (2003)		0,006 a 0,008 µg/L	7 ng/L	População EUA (NHANES)
Roth (2001)	15 ng/d (20 anos) 30 ng/d (50 anos)			
Santos (2001)	0,0280 µg/L (0,35 mBq/L)			
Thing (1999)	11 ng/L (0,135 mBq/L)		6,64 ng/L	499 indivíduos
Welford e Baird (1967)	0,007 µg/L (7 ng/L)	0,03-0,3 Nova Iorque 0,04-0,18 Chicago		
Byrne (1991)	12,8 ng/L	3-49 ng/L	9 ng/L	10 indivíduos
Hamilton (1994)	< 1 µg/L			População Reino Unido
Hiller (2000)	98% < 1µg/L			
Werner (2003)	20 ng /d (homens) 16,7 ng/d (mulheres)			Alemanha, Itália e Grã-Bretanha
Papas (2002)	108,8 ng/L			101 residentes Los Alamos

2.9.2 – EXCREÇÃO NATURAL DE URÂNIO NAS FEZES

A maioria do urânio ingerido (cerca de 500 µg/ano) é excretada nas fezes (Kapas, 2001). Pessoas não expostas podem excretar nas fezes até dezenas de microgramas de urânio por dia, dependendo da quantidade presente nos alimentos, na água e no ambiente. Portanto, é muito importante obter dados específicos de populações não expostas na mesma área e com o mesmo consumo alimentar do grupo ocupacionalmente exposto, segundo Stradling e cols (2002). De acordo com ele, indivíduos podem excretar de 10 ng a 400 ng de urânio natural por dia, sendo que os valores mais comuns estão entre 10 e 40 ng (Stradling e cols, 2002).

Eckerman e colaboradores (1999), ao interpretarem os dados de bioanálise de indivíduos ocupacionalmente expostos da Planta Y-12, nos EUA, estudaram um grupo controle. Através deste determinaram que a média geométrica da concentração de ^{238}U nas amostras de fezes de pessoas não ocupacionalmente expostas equivalia a uma excreção diária de 1,2 dpm, o que corresponde a 20 mBq.

Ao avaliar a atividade diária excretada de urânio, tanto nas fezes quanto na urina, é importante comparar os dados com a excreção diária de um grupo controle de pessoas não ocupacionalmente expostas, residentes no mesmo local dos indivíduos ocupacionalmente expostos ao urânio. Assim, ao interpretar os dados de bioanálise *in vitro*, será possível avaliar se existe possibilidade de ter ocorrido exposição ocupacional ou se a concentração de urânio em excreta se deve apenas à contribuição da dieta alimentar e da exposição ambiental (Roth e cols, 2001).

2.10 – GRUPO CONTROLE: CONCENTRAÇÃO DE URÂNIO NA URINA E NAS FEZES DOS HABITANTES DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO

A estimativa da contribuição ambiental na concentração do urânio presente na urina e nas fezes dos indivíduos ocupacionalmente expostos estudados no presente trabalho foi realizada utilizando os dados sobre a concentração de ^{238}U e ^{234}U nas fezes e ^{238}U na urina dos moradores da Cidade do Rio de Janeiro. Tal grupo foi composto por indivíduos não expostos à radiação ionizante (Sousa, 2005).

Como Resende (RJ) é um centro urbano com características similares às do município do Rio de Janeiro no que se refere a hábitos alimentares, e os fornecedores de alimentos são basicamente os mesmos, pode-se considerar que a dieta alimentar é a mesma nas duas cidades.

Na Tabela 2.7 têm-se a concentração de ^{238}U e ^{234}U nas fezes de 17 moradores da Cidade do Rio de Janeiro, analisadas por espectrometria alfa (Souza, 2005). A partir desses dados, calculou-se a média geométrica.

Tabela 2.7: Concentração de urânio em amostras de fezes de moradores da cidade do Rio de Janeiro (Souza, 2005).

Código	Massa de cinzas (g)	^{238}U (mBq/g)	^{238}U (mBq)	^{234}U (mBq/g)	^{234}U (mBq)
1	1,0	3,8	3,8	4,7	4,7
2	2,1	12,6	26,5	16,6	34,9
3	1,9	3,5	6,7	4,8	9,1
4	3,3	5,0	16,5	8,6	28,4
5	4,3	5,6	24,1	5,5	23,7
6	2,5	4,0	10,0	4,2	10,5
7	7,8	14,4	112,3	15,3	119,3
8	4,5	8,1	36,5	8,5	38,3
9	2,8	3,5	9,8	5,0	14,0
10	6,4	5,9	37,8	5,1	32,6
11	2,7	17,5	47,3	19,9	53,7
12	6,5	2,9	18,9	3,3	21,5
13	5,2	6,7	34,8	8,7	45,2
14	3,3	2,6	8,6	4,4	14,5
15	2,9	8,4	24,4	11,2	32,5
16	1,6	15,7	25,1	18,1	29,0
17	2,9	2,6	7,5	3,0	8,7
Média aritmética	3,6	7,2	26,5	8,6	30,6
Desvio padrão	1,9	4,9	25,5	5,6	26,7
Média geométrica	3,2	5,9	18,9	7,2	23,0

Na Tabela 2.8 têm-se a concentração de ^{238}U na urina de 65 moradores da Cidade do Rio de Janeiro, analisadas por ICP-MS, onde o LMD (limite mínimo detectável) foi 0,050 mBq/L (Souza, 2005).

Tabela 2.8: Concentração de ^{238}U na urina dos moradores da cidade do Rio de Janeiro (Sousa,2005).

Concentração de ^{238}U (mBq/L)	%	No. de indivíduos
<LMD	20,31	13
0,06	11	7
0,07	9,4	6
0,09	18,7	12
0,09	7,8	5
0,12	9,4	6
0,14	4,7	3
0,15	3,1	2
0,16	1,6	1
0,21	6,2	4
0,27	1,6	1
0,31	1,6	1
0,50	1,6	1
0,88	3,1	2

A partir dos dados da Tabela acima (2.8), calculou-se a concentração média de urânio em amostras de urina de moradores da Cidade do Rio de Janeiro, mostrados na Tabela 2.9.

Tabela 2.9: Concentração média de ^{238}U na urina dos moradores da Cidade do Rio de Janeiro.

	Concentração média de ^{238}U	No. de indivíduos
Média aritmética	0,128mBq/L (10,40 ng/L)	
Desvio padrão	0,157 mBq/L	65
Média geométrica	0,091 mBq/L (7,42 ng/L)	

A média geométrica fornece uma melhor estimativa da tendência dos dados de uma distribuição, que possui uma cauda superior, na parte final da distribuição. Esse tipo de distribuição é comum na avaliação dos resultados das análises de elementos químicos no sangue e urina, devido à exposição ambiental. A média geométrica é menos influenciada pelos altos valores do que a média aritmética, de acordo com o *Second National Report on Human Exposure to Environmental Chemicals* (2003).

Concentrações menores que o limite de detecção (LD) foram estimados dividindo-se o LD pela $\sqrt{2}$, para calcular a média geométrica. Se mais de 40% dos resultados forem menores que o LD, a média geométrica não é calculada, segundo o *Second National Report on Human Exposure to Environmental Chemicals* (2003).

2.11 – INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DE BIOANÁLISE

A interpretação dos dados de bioanálise constitui uma forma de avaliar a incorporação de radioanuclídeos por seres humanos. Os modelos biocinéticos permitem avaliar as atividades presentes nos órgãos e as frações excretadas pelas fezes e urina em função do tempo. Através de um cálculo retrospectivo, pode-se estimar a incorporação do radionuclídeo. Sendo assim, o cálculo da dose comprometida efetiva baseia-se nos resultados das técnicas de bioanálise *in vitro* e *in vivo* associados a métodos interpretativos. A interpretação dos resultados é muito complexa, uma vez que vários parâmetros devem ser levados em consideração, tais como:

- Via de incorporação;
- Modelo temporal de incorporação (incorporação única, crônica durante as horas de trabalho, por um determinado período de tempo, etc);
- Retenção do material no corpo, considerando os processos de liberação biológica, vias de eliminação e o decaimento radioativo;
- Data da incorporação;
- Exposição a diferentes compostos.

O cálculo da atividade incorporada é realizado a partir dos resultados da atividade de ^{238}U e ^{234}U na excreção urinária e fecal. Para isto, utilizou-se o *software* AIDE (*Activities and Internal Dose Estimates*), versão 2E desenvolvido por Luiz Bertelli Neto (Melo e col 2005). Este código foi desenvolvido para cálculos de atividade e dose comprometida devido a exposições ocupacionais e estimativas de atividade incorporada e dose, a partir de dados de bioanálise, compreendendo de três módulos básicos:

a) Módulo de cálculo de atividade e dose interna:

Esse módulo permite o cálculo da atividade e da dose comprometida em diversos órgãos, da dose efetiva comprometida e também da atividade excretada via urina e fezes, a partir de uma dada incorporação de um dado radionuclídeo, o qual tenha seu modelo biocinético catalogado na biblioteca do código. Para os cálculos é necessária a entrada dos seguintes parâmetros: o modelo biocinético do elemento incorporado, o isótopo incorporado, a via de incorporação (inalação, ingestão ou injeção), o modo de incorporação (única, contínua, trabalhador ou severa), para incorporações de particulados

via inalação devem ser fornecidos o DAMA e a classe de absorção para o sangue (F, M, S padrão ou com parâmetros f_s , s_s e s_r modificados) de acordo com o modelo do trato respiratório (ICRP, 1994), os valores de f_1 são automaticamente gerados, mas podem ser alterados pelo usuário, o período de incorporação em dias, a atividade incorporada (Bq) ou a taxa de incorporação ($\text{Bq}\cdot\text{d}^{-1}$), dias após o início da incorporação para o cálculo da atividade ou dose.

b) Módulo de edição de modelos

Este módulo permite ao usuário catalogar na biblioteca de modelos do código, seu próprio modelo biocinético sistêmico, para qualquer elemento químico. Para editar o seu modelo no código AIDE o usuário deve fornecer os seguintes parâmetros: o elemento químico de interesse, os valores de f_1 para inalação e ingestão, os órgãos/tecidos que compõe o modelo, seus compartimentos, frações de retenção de cada compartimento e suas meias-vidas biológicas de liberação, de forma a descrever a distribuição do elemento o corpo humano, a partir do sangue até a excreção via urina e fezes.

c) Modelo de interpretação de bioanálise

Este módulo permite ao usuário, estimar a dose ou a atividade incorporada em exposições ocupacionais, para uma série de radionuclídeos a partir de dados obtidos por bioanálise, utilizando a metodologia da publicação 78 de ICRP (ICRP 1999). Este módulo não foi empregado neste trabalho.

Tal programa possibilita a simulação do modelo de incorporação (incorporação única, crônica durante o horário de trabalho).

É possível derivar as frações de retenção da incorporação esperada na urina e nas fezes, para um tempo t após a incorporação diária de 1 Bq de urânio, durante o período de exposição. A determinação da via de incorporação e do tipo de composto incorporado pode ser feita por comparação entre as razões urina:fezes da atividade encontrada experimentalmente e a esperada na simulação teórica, utilizando-se o código computacional AIDE.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

3.1 – DEFINIÇÃO DO GRUPO EM ESTUDO

Foram selecionados para serem estudados no presente trabalho dois grupos de trabalhadores na Fábrica de Combustível Nuclear (FCN): um grupo da Unidade 1 e outro grupo da Unidade 2.

Foram coletadas amostras de fezes e urina e realizadas medidas de atividade de ^{238}U e ^{235}U nos pulmões de 43 indivíduos selecionados da Unidade 1 que trabalham na montagem do elemento combustível. As mesmas monitorações foram realizadas para 38 indivíduos selecionados da Unidade 2 da FCN. Desses, 28 trabalham na produção da pastilha de UO_2 e 10 na produção de pó de UO_2 .

Todas as amostras foram coletadas no dia de folga. Tais indivíduos apresentam potencial risco de contaminação interna.

Para que seja avaliada a exposição ocupacional é necessário conhecer a contribuição da exposição ambiental (grupo controle).

3.2 – BIOANÁLISE *IN VITRO*

3.2.1 – COLETA DAS AMOSTRAS

No ano de 2002, com a Unidade 2 da Fábrica em funcionamento, foram coletadas amostras de 81 indivíduos das Unidades 1 e 2 com potencial risco de contaminação interna.

As amostras de urina foram coletadas em frascos de polietileno, lacradas e rotuladas com o nome do indivíduo e data da coleta, acondicionadas e enviadas ao Laboratório de Bioanálise *In Vitro* do Serviço de Monitoração Interna (SEMIN) do Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD/CNEN). Para melhor interpretação dos resultados em termos de atividade incorporada, foram coletadas amostras de 24 horas de excreção urinária e fecal.

3.2.2 – DETERMINAÇÃO DE ^{238}U , ^{234}U E ^{235}U EM AMOSTRAS DE FEZES

3.2.2.1 – Procedimento de análise de urânio em amostras de fezes

A técnica para determinar a concentração de ^{238}U , ^{234}U e ^{235}U nas amostras envolve três etapas: abertura da amostra; separação radioquímica; e determinação da concentração de ^{238}U e ^{234}U por espectrometria alfa.

O processo de análise das amostras de fezes inicia-se com a calcinação em forno à temperatura de 400°C por 48 horas. Depois de calcinadas, as amostras passam por um processo de abertura, que tem como objetivo a eliminação da matéria orgânica. Tal tratamento envolve reações de oxi-redução com ácido nítrico, água oxigenada, ácido fluorídrico e ácido perclórico. Após a eliminação completa da matéria orgânica e a diminuição da matriz, o resíduo é dissolvido em 1 litro de ácido nítrico 1M. Essa solução é transferida para uma coluna, onde é feita a separação química do urânio, através da extração cromatográfica com óxido de tri-n-octil fosfina (TOPO) e sílica gel silanizada. O TOPO é um reagente eficiente na extração de actínídeos. O urânio é eluído com fluoreto de amônio, e recolhido em cápsula de *teflon*, conforme mostra a Figura 3.1.

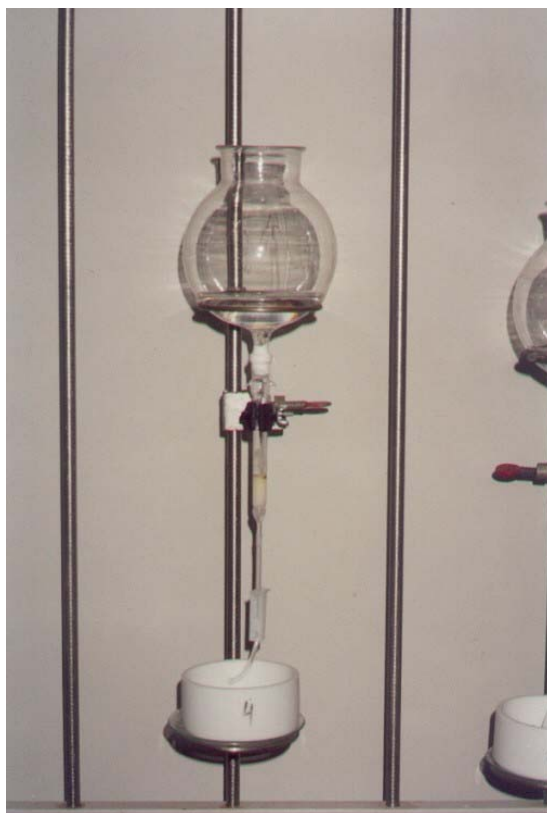


Figura 3.1: Coluna cromatográfica.

A seguir, a solução contendo urânio é tratada com ácidos minerais e transferida para uma célula de deposição, a qual contém uma plaqueta de aço inox recoberta com uma membrana polimérica, preparada com TOPO e vinol, como mostra a Figura 3.2.

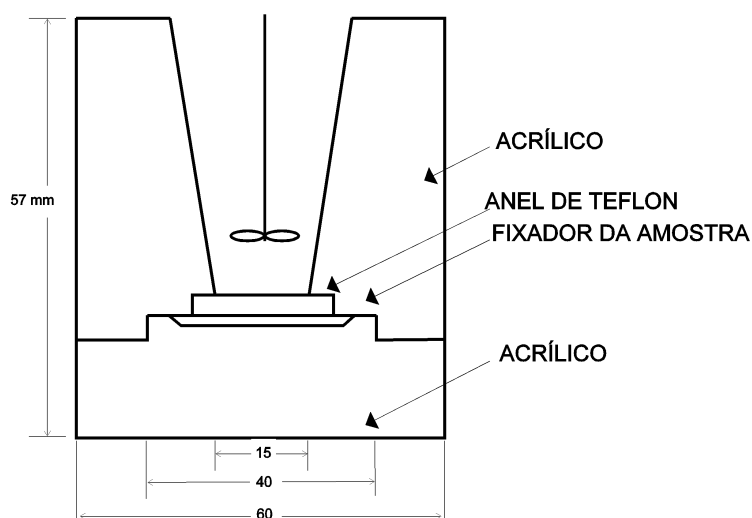


Figura 3.2: Esquema da célula de deposição.

A plaqueta é então calcinada à 400°C para a eliminação do polímero, e analisada em um sistema de espectrometria alfa.

Utilizou-se detectores do tipo barreira de superfície (ORTEC), contidos em câmaras de vácuo. Cada um desses módulos é composto por dois detectores de silício-lítio, com janela de alumínio. Na geometria de contagem utilizada, a eficiência de contagem é, em média, 30%. O espectro de emissores alfa é analisado com o auxílio do programa MAESTRO II da ORTEC, versão 3.0, que identifica os radioisótopos e determina a área sob a região de interesse.

A Figura 3.3 apresenta um espectro alfa de uma amostra contendo isótopos de urânio. O limite de detecção (Asthuller e Pasternack, 1963) desta metodologia para ^{238}U e ^{234}U é de 1 mBq/g de cinza.

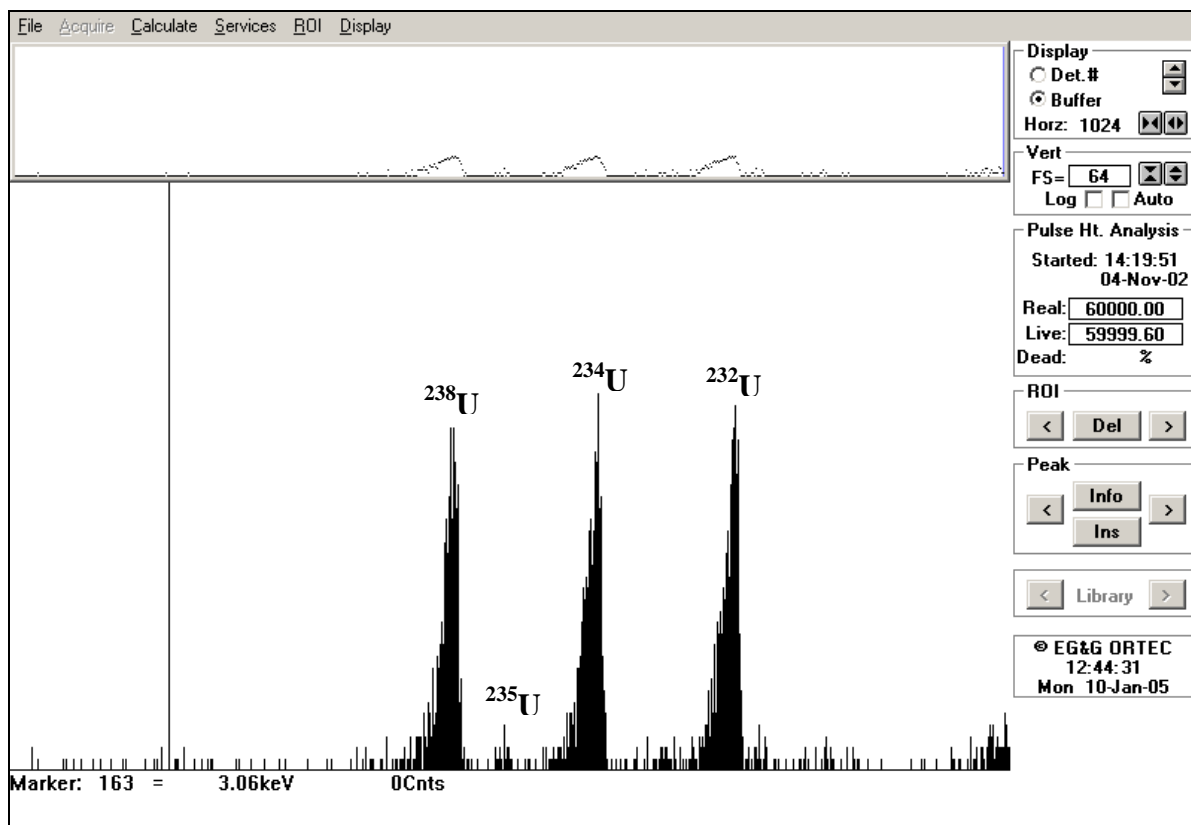


Figura 3.3: Espectro alfa de isótopos de urânio.

Os procedimentos experimentais descritos acima estão baseados no método de análise radioquímica e espectrométrica desenvolvido no Laboratório de Bioanálise *in vitro* do IRD/CNEN (Azeredo e cols, 1991; Julião e cols, 2003). A técnica de extração por filme de TOPO foi desenvolvida no Serviço de Monitoração Ambiental do IRD/CNEN (Sachet e cols, 1984).

3.2.2.2 – Cálculo do rendimento radioquímico e da atividade da amostra

A atividade da amostra e o rendimento radioquímico são calculados a partir da análise dos espectros, através do procedimento que será descrito a seguir:

- **Rendimento radioquímico:**

O rendimento radioquímico (R) é calculado através da seguinte fórmula:

$$R = \frac{R_1 - R_2}{T_c \times E_d \times A_t} \quad (3.1)$$

onde R_1 é o total de contagens na região do traçador; R_2 é o total de contagens da radiação de fundo na região do traçador; T_c é o tempo de contagem em minutos; E_d é a eficiência do detector; e A_t é a atividade adicionada de traçador em desintegrações por minuto (dpm).

O rendimento radioquímico médio encontrado em todas as análises realizadas no presente trabalho foi 90%.

- **Atividade da amostra:**

A atividade da amostra em Bq (A), foi calculada utilizando-se a seguinte fórmula: onde R_3 é o total de contagens na região de interesse; R_4 é o total de contagens da radiação

$$A = \frac{R_3 - R_4}{T_c \times E_d \times R \times 60} \quad (3.2)$$

de fundo na região de interesse; T_c é o tempo de contagem da amostra e da radiação de fundo em minutos; E_d é a eficiência do detector; R é o rendimento radioquímico; e 60 é o fator de conversão de minutos para segundos.

- **Cálculo da Incerteza associada à determinação da atividade da amostra:**

A incerteza associada ao resultado final de uma análise podem ser estimados propagando-se as incertezas individuais de cada fator. Se x , y , z , ... são contagens medidas diretamente, ou variáveis para as quais se conhece σ_x , σ_y e σ_z , então o desvio padrão para uma determinada quantidade u , derivada dessas contagens, pode ser calculada a partir da seguinte expressão:

$$\sigma_u^2 = \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2 \quad (3.3)$$

onde $u = u(x, y, z)$ representa o valor derivado.

A Equação 3.3 é a fórmula de propagação das incertezas, aplicável em situações relacionadas a medidas radiométricas. A partir da referida equação, as atividades médias das amostras analisadas neste trabalho foram calculadas, com intervalo de confiança de 95%.

3.2.2.3 – Desconto da contribuição ambiental no cálculo da concentração de ^{238}U nas amostras de fezes.

Para descontar a contribuição ambiental referente ao ^{238}U nas amostras analisadas, utilizou-se a seguinte equação:

$$^{238}\text{U}_{\text{Líquido}} = ^{238}\text{U}_{\text{fezes}} - (\text{Bg}_g \times m_{\text{cinzas, indivíduo}}) \quad (4.1)$$

onde:

$^{238}\text{U}_{\text{Líquido}}$ = Concentração de ^{238}U nas fezes (mBq) após o desconto da contribuição ambiental;

$\text{U-}^{238}\text{fezes}$ = Concentração de ^{238}U nas fezes (mBq);

Bg_g = Média geométrica das concentrações de ^{238}U nas amostras de fezes de indivíduos da população do Rio de Janeiro, em mBq por grama de cinza (5,93 mBq/g);

$m_{\text{cinzas, indivíduo}}$ = Massa de cinzas da amostra de fezes fornecida pelo indivíduo (g).

3.2.2.4 – Desconto da contribuição ambiental no cálculo da concentração de ^{234}U nas amostras de fezes.

O desconto da contribuição ambiental do ^{234}U foi feito da mesma forma que para o ^{238}U , seguindo a Equação abaixo.

$$^{234}\text{U}_{\text{Líquido}} = ^{234}\text{U}_{\text{fezes}} - (\text{Bg}_g \times m_{\text{cinzas, indivíduo}}) \quad (4.2)$$

onde:

$^{234}\text{U}_{\text{Líquido}}$ = Concentração de ^{234}U nas fezes (mBq) após o desconto da contribuição ambiental;

$^{234}\text{U}_{\text{fezes}}$ = Concentração de ^{234}U nas amostras de fezes dos trabalhadores (mBq);

Bg_g = Média geométrica das concentrações de ^{234}U nas amostras de fezes de indivíduos da população do Rio de Janeiro, que é 7,20 mBq/g;

$m_{\text{cinzas, indivíduo}}$ = Massa de cinzas do indivíduo (g);

3.2.3- DETERMINAÇÃO DE ^{238}U EM AMOSTRAS DE URINA

3.2.3.1 – Determinação de urânio em amostras de urina por ICP-MS

A determinação da concentração em massa de urânio foi realizada utilizando a técnica de Espectrometria de Massa com Plasma Acoplado (ICP-MS). A técnica de

análise é rápida, apresenta um baixo limite de detecção e requer somente uma diluição. A técnica consiste na diluição de uma alíquota de 0,5 ml de amostra de urina de 24 horas é diluída na proporção de 1:20 pela adição de 8,5ml de HNO₃ a 2%, preparado a partir de HNO₃ supra-puro e água mili-Q (Santos e cols, 2001).

Antes de realizar a medida é adicionado 1 ml de padrão interno de índio e tálio para garantir a qualidade da medida no ICP-MS. Esse padrão é para indicar se houve perdas por excesso de resíduos, causando entupimento das mangueiras do equipamento, ao realizar a medida.

O limite de detecção (LD) para ²³⁸U em amostras de urina dos trabalhadores da FCN foi $6,0 \times 10^{-2}$ mBq/L.

3.2.3.2 – Desconto da contribuição ambiental no cálculo da concentração de urânio nas amostras de urina.

A técnica de ICP-MS utilizada na análise das amostras de urina determina apenas a concentração de ²³⁸U em massa, não tem sensibilidade para quantificar o ²³⁴U. Como os dados de fezes indicam que houve exposição ocupacional a ²³⁴U, utilizou-se a mesma razão entre ²³⁸U e ²³⁴U encontrada nas fezes através da espectrometria alfa, para se estimar a atividade de ²³⁴U que seria encontrada na urina.

Considerou-se ainda que a concentração de ²³⁴U na urina de pessoas não ocupacionalmente expostas estava em equilíbrio com a de ²³⁸U, ou seja, igual a 0,0916 mBq/L, conforme citado anteriormente na Tabela 2.9.

Como os resultados da análise de urina através da técnica de ICP-MS são obtidos para o ²³⁸U, este isótopo será o isótopo preferencial para a análise. A estimativa da concentração de ²³⁴U em amostras de urina só vai ser utilizada quando não for possível usar os valores referentes ao ²³⁸U

Alguns autores não consideram a contribuição da exposição ambiental na interpretação dos dados de excreção urinária, pois em todos os estudos de exposição ambiental uma parcela significativa dos resultados encontra-se abaixo do limite de detecção. Neste trabalho, optou-se em descontar a contribuição da exposição ambiental para uniformizar o procedimento adotado para análise dos resultados de fezes e urina.

3.3 – CÁLCULO DA ATIVIDADE INCORPORADA

Para a instalação objeto do presente estudo, a via mais provável de incorporação é a inalação de particulados. Esta hipótese foi testada em todos os casos estudados. A verificação é feita comparando-se a razão entre as atividades de urânio nas amostras de urina e fezes (experimental) com a razão dos valores teóricos $m(t)$ para urina e fezes, derivadas a partir do modelo teórico. Considera-se inicialmente a inalação de um composto classificado como tipo S, quanto à absorção no sangue, e com DAMA igual a 1 μm .

No referido programa é possível alterar internamente os parâmetros de absorção associados ao sistema respiratório, dependendo do tipo de composto inalado e da sua solubilidade. Sendo assim, testou-se parâmetros internos específicos para o óxido de urânio (UO_2), sugeridos na literatura. Através da comparação da razão urina:fezes obtida experimentalmente com as obtidas através do modelo teórico recomendado pela ICRP e com aquelas obtidas modificando-se os parâmetros internos deste último, é possível uma estimativa mais realista da solubilidade do composto e da principal via de incorporação.

Utiliza-se a Equação abaixo para calcular a atividade incorporada:

$$I = M / m(t)$$

onde:

I = Atividade de ^{238}U ou ^{234}U incorporada (Bq);

M = Resultado da bioanálise (no caso de excreção, refere-se ao período de 24 horas);

$m(t)$ = Valor da fração de retenção ou excreção no tempo t após a incorporação diária de 1 Bq (por inalação ou ingestão), conforme o modelo de incorporação do trabalhador.

3.4 – CÁLCULO DA DOSE EFETIVA COMPROMETIDA

A dose efetiva comprometida proveniente da incorporação de urânio enriquecido tem como principal contribuinte o ^{234}U . Para o urânio enriquecido de 3,5% a 5% em massa, a composição isotópica em atividade é em torno de 80% para ^{234}U , 4% para ^{235}U e 16% para ^{238}U . Além da maior abundância isotópica de ^{234}U , o fator de conversão de dose dele é maior se comparado ao do ^{235}U e ao do ^{238}U .

A razão $^{238}\text{U} / ^{234}\text{U}$ para as amostras de fezes dos trabalhadores varia de 0,2 a 0,5. A razão 0,2 foi escolhida para representar a razão isotópica e podemos concluir que a atividade de ^{238}U incorporada é 1/5 da quantidade de ^{234}U incorporada. A escolha desta

reação implica na super estimativa da dose em relação às outras razões encontradas. Para o cálculo da dose vamos considerar que toda incorporação é devido ao ^{234}U . Neste caso estamos superestimando a dose devido a mistura de compostos de urânio. O erro no cálculo da incorporação e as incertezas da composição isotópica são tão grandes que não se torna necessário calcular a dose para cada isótopo individualmente. Quando a incorporação é calculada para o ^{238}U , esta é multiplicada por 6 e a dose calculada para ^{234}U . Quando a incorporação é calculada para ^{234}U a dose é calculada somente para ^{234}U .

Calcula-se a dose utilizando-se os fatores de conversão de dose, conforme a Equação abaixo:

$$E_{(50)} = I \text{ (Bq)} \times e_{(50)} \text{ (Sv/Bq)} \text{ Sv}$$

onde:

I = Atividade Incorporada;

$e_{(50)}$ = Coeficiente de dose para inalação e ingestão de ^{234}U (Sv/Bq) gerado a partir das modificações dos parâmetros f_r , s_s , s_r realizadas no sistema computacional AIDE;

Considera-se o ^{234}U , pois é o que mais influencia a dose quando comparado ao ^{235}U e ao ^{238}U .

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – UNIDADE 1 DA FCN

Conforme descrito no Capítulo 2, na Unidade 1 da FCN ocorre a montagem do elemento combustível. Nesta etapa do processo, a pastilha está na forma de UO_2 sinterizado. Durante o ano de 2002, a montagem do elemento combustível foi realizada no período de 04/01/2002 a 15/05/2002, durante 131 dias.

4.1.1 – BIOANÁLISE *IN VIVO*

Os trabalhadores foram monitorados no Contador de Corpo Inteiro do IRD/CNEN, para determinação das atividades de ^{238}U e ^{235}U nos pulmões. Todos os trabalhadores monitorados apresentaram resultados menores que os limites mínimos de detecção, que são 46 Bq para ^{238}U e 6,5 Bq para ^{235}U (Azeredo e cols, 2003).

4.1.2 – BIOANÁLISE *IN VITRO*

Os resultados das atividades de urânio nas amostras de excreção diária de fezes e urina dos trabalhadores da Unidade 1 da FCN estão apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2.

4.1.2.1 – Análise dos dados de Bioanálise *In Vitro*

Os dados apresentaram uma variação muito grande quando analisados como um todo. As atividades de urânio encontradas nas amostras de urina variam de menor que o limite mínimo de detecção (LMD), que é 0,061 mBq/L, até 0,94 mBq/L de urina. As excreções diárias de ^{238}U nas amostras de fezes variam de 1,5 até 69,7 mBq/dia para ^{238}U , e de 1,5 até 134,1 mBq/dia para ^{234}U .

Trabalhos recentes sobre a excreção de urânio natural devido à exposição ambiental em amostras de fezes de indivíduos de populações não expostas indicam que a razão isotópica $^{238}\text{U}/^{234}\text{U}$ é maior do que 0,6 (Sousa, 2005).

A excreção de urânio nas fezes dos trabalhadores expostos ao urânio enriquecido caracteriza-se pela concentração de ^{234}U ser maior do que a concentração de ^{238}U . A eliminação de urânio faz-se rapidamente através das fezes, e lentamente através da urina. Assim, a excreção fecal de urânio reflete contaminações recentes.

Para uma melhor avaliação dos dados de excreção, os trabalhadores da Unidade 1 da FCN, estudados no presente trabalho, foram divididos em dois grupos, seguindo os parâmetros abaixo:

- Grupo 1: Amostras de fezes com a razão $^{238}\text{U}/^{234}\text{U}$ maior que 0,6; como pode ser observado na Tabela 4.1
- Grupo 2 (grupo com alta probabilidade de ter sido exposto a urânio enriquecido): Amostras de fezes em desequilíbrio isotópico entre o ^{238}U e o ^{234}U , com a razão $^{238}\text{U}/^{234}\text{U}$ menor que 0,6 como pode se observado na Tabela 4.2.

Tabela 4.1: Resultados das atividades de urânio nas amostras de excreção dos trabalhadores do Grupo 1.

Código do trabalhador	Dias após o início da operação ^a	Massa ^b (g cinza)	^{238}U (mBq/dia) fezes	^{234}U (mBq/dia) fezes	$^{238}\text{U}/^{234}\text{U}$ fezes	^{238}U (mBq/L) urina
193	106	1,2	5,7 ± 1,5	5,1 ± 1,4	1,1	0,33 ± 0,02
194	115	2,4	19,0 ± 4,2	18,7 ± 4,2	1,0	<LD
255	115	1,8	1,8 ± 0,3	1,8 ± 0,3	1,0	0,06 ± 0,01
182	118	3,7	69,7 ± 10,9	60,6 ± 10,0	1,1	0,18 ± 0,04
192	118	5,0	19,4 ± 6,4	17,2 ± 6,0	1,1	<LQ
201	118	3,3	13,8 ± 4,5	16,4 ± 4,8	0,8	<LD
203	118	4,0	18,0 ± 4,7	26,4 ± 5,7	0,7	<LD
261	118	1,5	1,5 ± 0,3	1,5 ± 0,3	1,0	0,10 ± 0,08
259	118	3,4	37,9 ± 6,1	46,9 ± 7,0	0,8	<LD
253	118	4,5	14,0 ± 4,0	22,0 ± 5,6	0,6	0,06 ± 0,04
212	122	2,0	5,7 ± 1,9	8,0 ± 2,2	0,7	<LD
184	122	0,6	5,6 ± 1,1	8,3 ± 1,4	0,7	0,09 ± 0,03
187	122	2,3	15,5 ± 4,8	16,0 ± 4,9	1,0	<LD
188	122	5,2	25,4 ± 7,0	39,6 ± 8,9	0,6	<LD
200	122	1,7	7,5 ± 1,7	7,6 ± 1,8	1,0	<LD
208	122	4,8	13,1 ± 4,8	18,4 ± 5,6	0,7	<LD
209	122	4,0	24,0 ± 5,0	31,6 ± 5,8	0,8	<LD
249	122	0,8	8,4 ± 1,9	13,9 ± 2,4	0,6	<LD
185	132	5,1	33,9 ± 10,5	35,9 ± 10,7	0,9	0,06 ± 0,02
195	132	5,9	30,2 ± 10,4	32,0 ± 7,9	0,9	<LD
196	132	4,1	15,0 ± 3,95	21,5 ± 4,7	0,7	<LD
197	132	7,5	32,6 ± 8,5	50,5 ± 10,7	0,6	0,09 ± 0,02
198	132	3,7	17,9 ± 6,0	27,3 ± 7,4	0,7	0,07 ± 0,02
199	132	3,4	20,7 ± 4,9	18,0 ± 4,5	1,1	<LD
202	132	5,0	26,0 ± 6,5	35,5 ± 7,6	0,7	<LD
204	132	4,1	13,1 ± 4,2	18,9 ± 5,6	0,7	<LD
205	132	4,9	4,9 ± 1,0	4,9 ± 1,0	1,0	<LD
206	132	4,8	17,4 ± 4,9	19,1 ± 5,1	0,9	<LD
207	132	2,3	3,2 ± 1,8	2,9 ± 1,7	1,1	<LD

Tabela 4.1 (continuação) Resultados das atividades de urânio nas amostras de excreção dos trabalhadores do Grupo 1.

Código do trabalhador	Dias após o início da operação ^a	Massa ^b (g cinza)	²³⁸ U (mBq/dia) fezes	²³⁴ U (mBq/dia) fezes	²³⁸ U/ ²³⁴ U fezes	²³⁸ U (mBq/L) urina
211	132	2,5	13,5 ± 5,9	17,6 ± 7,3	0,7	<LD
242	132	2,6	6,9 ± 2,5	10,4 ± 3,0	0,7	<LD
251	132	4,0	12,8 ± 3,5	18,3 ± 4,4	0,7	0,09 ± 0,01
250	132	4,0	19,7 ± 4,6	25,6 ± 5,2	0,8	<LD
272	132	5,6	21,4 ± 5,6	29,6 ± 6,6	0,7	0,06 ± 0,03
266	132	4,4	18,0 ± 4,9	28,9 ± 6,2	0,6	0,34 ± 0,06
247	132	4,3	21,8 ± 4,7	22,9 ± 4,8	0,9	<LD
243	132	2,4	9,5 ± 2,7	11,3 ± 2,9	0,8	0,29 ± 0,03

^adata da coleta das amostras de excreta em dias após o início do período de montagem do elemento combustível .

^bmassas das amostras de fezes calcinadas

Tabela 4.2: Resultados das atividades de urânio nas amostras de excreção dos trabalhadores do Grupo 2.

Código do amostra	Dias após o início da operação ^a	Massa ^b (g cinza)	²³⁸ U (mBq/dia) fezes	²³⁴ U (mBq/dia) fezes	²³⁸ U/ ²³⁴ U fezes	²³⁸ U (mBq/L) urina
189	106	3,3	53,3 ± 7,6	134,1 ± 14,4	0,4	0,30 ± 0,01
191	106	3,5	14,5 ± 4,1	32,6 ± 6,3	0,4	0,23 ± 0,01
190	122	4,2	15,3 ± 5,2	37,9 ± 8,2	0,4	0,17 ± 0,02
183	132	4,7	24,8 ± 8,4	116,9 ± 19,8	0,2	0,12 ± 0,04
186	132	2,3	19,7 ± 5,8	72,6 ± 12,1	0,3	0,09 ± 0,01
210	132	2,0	12,8 ± 3,1	27,4 ± 4,7	0,5	0,94 ± 0,06

^adata da coleta das amostras de excreta em dias após o início do período de montagem do elemento combustível .

^bmassas das amostras de fezes calcinadas

Na Tabela 4.1 observa-se que as atividades de ²³⁸U e ²³⁴U encontradas nas amostras de fezes e urina variam entre 1,5 e 69,7 mBq/dia para ²³⁸U e entre 1,5 e 60,6 mBq/dia para ²³⁴U. No presente estudo, o período de montagem do elemento combustível foi de 131 dias, e as amostras foram coletadas nos dias de folga. As amostras codificadas como 193, 266 e 243 apresentam concentrações de urânio relativamente baixas nas fezes e concentrações de urânio na urina mais altas do que os demais trabalhadores do mesmo grupo.

Concentrações relativamente altas na urina, maiores do que 0,27 mBq/L, correspondem a 6% das amostras de residentes não expostos no Rio de Janeiro, e são também relativamente altas quando comparadas com as concentrações na urina do Grupo 2.

Quando o modelo teórico para compostos do tipo S de urânio é aplicado, para exposição crônica de trabalhadores, durante 5 dias da semana, verificamos que, durante o fim de semana, as concentrações de urânio nas fezes e na urina diminuem para cerca de 50% das concentrações esperadas no último dia de trabalho da semana, como pode ser visto nas Figuras 4.1 e 4.2.

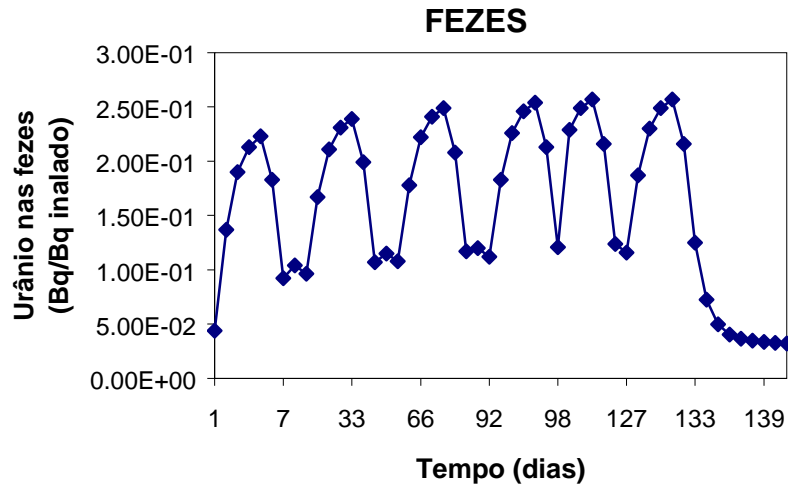


Figura 4.1: Concentração de urânio teórica nas fezes (período de 131 dias de trabalho, com descanso semanal de dois dias).

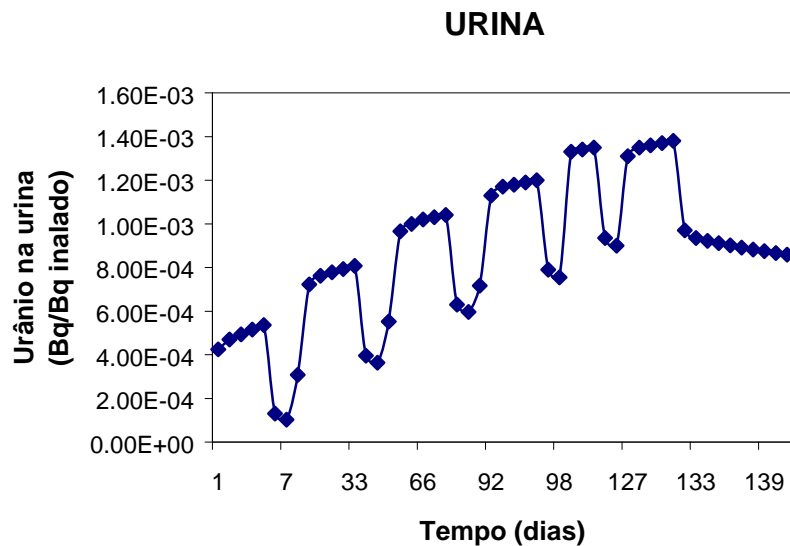


Figura 4.2: Concentração de urânio teórica na urina (131 dias de trabalho com descanso semanal de dois dias).

Observa-se também que, três dias após o término da incorporação, o valor excretado nas fezes é cerca de 30% do que é eliminado no último dia do período de incorporação.

Já quando o modelo para compostos tipo S, conforme descrito na publicação 66 da ICRP (1994), é aplicado para incorporações de curta duração, observamos que as concentrações em fezes diminuem mais rapidamente do que as concentrações em urina, sempre tomando como ponto de referência a excreção um dia após a incorporação, conforme pode ser visualizado na Figura 4.3.

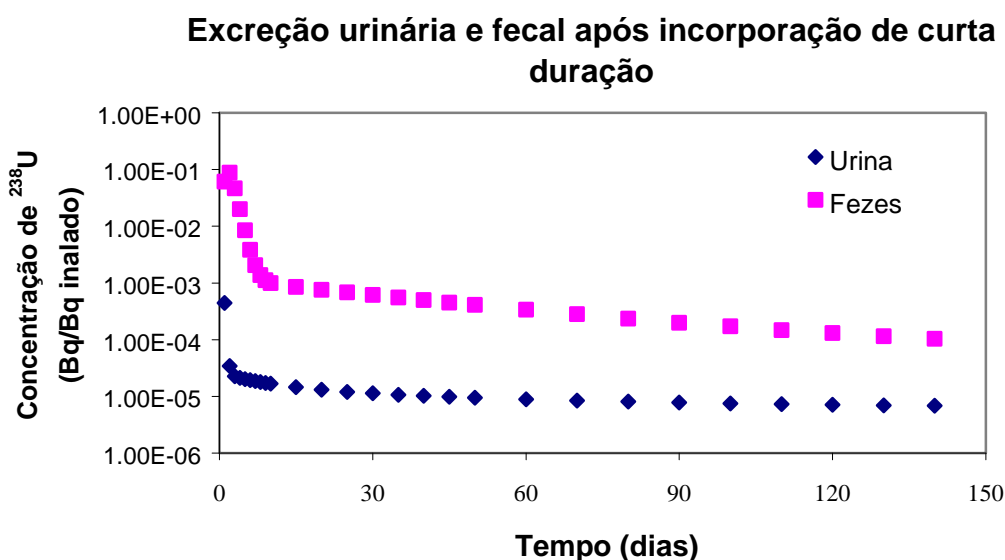


Figura 4.3: Concentração de ^{238}U teórica na urina após uma incorporação de curta duração.

Assim, os trabalhadores codificados como 193, 266 e 243 poderiam ter sido expostos por um período de curta duração (exposição aguda). Neste caso, as concentrações de urânio nas fezes devido à exposição ocupacional poderiam ter se tornado indistinguíveis da exposição ambiental, explicando-se assim as concentrações relativamente altas na urina desses trabalhadores como devidas à incorporação de UO_2 no ambiente de trabalho. Por outro lado, as concentrações na urina desses trabalhadores podem ser atribuídas, simplesmente, à exposição ambiental.

Na Tabela 4.2, observa-se que as concentrações de ^{238}U nas amostras de fezes dos seis trabalhadores estão entre 12,8 e 53,3 mBq/dia. As concentrações de ^{234}U nas amostras de fezes dos seis trabalhadores estão entre 27,4 e 134,1 mBq/dia. Essas atividades refletem a exposição ocupacional e a excreção do urânio natural. As

concentrações de ^{238}U e de ^{234}U presentes nas amostras de fezes desse grupo de trabalhadores apresentam desequilíbrio isotópico entre o ^{238}U e o ^{234}U , com a razão $^{238}\text{U}/^{234}\text{U}$ menor que 0,6, indicando que houve exposição a urânio enriquecido. Para avaliação da exposição a urânio enriquecido, estudou-se a razão urina:fezes nas amostras desses trabalhadores.

AVALIAÇÃO DA RAZÃO URINA:FEZES DOS TRABALHADORES DO GRUPO 2

Para realizar esta avaliação, tornou-se necessário analisar as concentrações de urânio nas fezes e na urina, após o desconto das contribuições ambientais, conforme descrito no item 3.2.2.3 do capítulo 3 (Metodologia).

a) Atividades de ^{238}U em amostras de excreta

Na Tabela 4.3 estão apresentados as atividades de ^{238}U nas amostras de fezes dos trabalhadores do Grupo 2, após o desconto da contribuição ambiental.

Tabela 4.3: Atividades de ^{238}U nas amostras de fezes dos trabalhadores do Grupo 2 (exposto), após o desconto da contribuição ambiental

Código do trabalhador	Dias após o início da operação ^a	Massa ^b (g cinza)	^{238}U (mBq/dia)	^{238}U (mBq/dia) líquido ^c
189	106	3,3	53,3	33,8
191	106	3,5	14,5	insignificante
190	122	4,2	15,3	insignificante
183	132	4,7	24,7	insignificante
186	132	2,3	19,7	6,1
210	132	2,0	12,8	0,6

^a data da coleta das amostras de excreta em dias após o início do período de montagem do elemento combustível.

^b massas das amostras de fezes calcinadas

^c Concentrações de ^{238}U nas amostras de fezes após o desconto da contribuição ambiental

Das seis amostras analisadas, três apresentaram resultados em mBq/g menores do que a contribuição ambiental. Após o desconto desta contribuição, apenas as amostras 189 e 186 apresentaram concentrações de ^{238}U nas fezes acima da contribuição ambiental.

Quanto à urina, também foi descontada a atividade referente à exposição ambiental da atividade total excretada por cada um dos trabalhadores, conforme

descrito item 3.2.3.2 do Capítulo 3 (Metodologia). A média geométrica de ^{238}U nas amostras de urina de indivíduos não ocupacionalmente expostos é 0,0916 mBq/L. Este valor foi descontado da atividade total excretada na urina, de cada um dos trabalhadores, como mostra a Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Atividades de ^{238}U nas amostras de urina dos trabalhadores do Grupo 2 (exposto) após o desconto da contribuição ambiental

Código do trabalhador	Dias após o início da operação ^a	Amostras de urina		
		^{238}U (mBq/L)	^{238}U (mBq/dia)	^{238}U (mBq/dia) líquido ^b
189	106	0,3	0,4	0,3
191	106	0,2	0,3	0,2
190	122	0,2	0,2	0,1
183	132	0,1	0,2	<i>insignificante</i>
186	132	0,1	0,1	<i>insignificante</i>
210	132	0,9	1,3	1,2

^a data da coleta das amostras de excreta em dias após o início do período de montagem do elemento combustível.

^b Concentrações de ^{238}U nas amostras de urina após o desconto da contribuição ambiental

Os trabalhadores 183 e 186 apresentam concentração de ^{238}U nas amostras de urina bem próximas da excreção devido a contribuição ambiental. Apenas o trabalhador 189 apresenta dados positivos tanto para fezes quanto para urina. É possível calcular a razão urina:fezes apenas deste último trabalhador.

b) Concentração de ^{234}U em amostras de excreta

Como os dados de fezes indicam que houve exposição ocupacional a ^{234}U , optou-se por analisar também o ^{234}U e calcular a razão urina:fezes relativa ao ^{234}U .

Na Tabela 4.5 estão apresentados os valores das concentrações de ^{234}U nas amostras de fezes dos trabalhadores do Grupo 2, após o desconto da contribuição ambiental, conforme descrito no item 3.2.2.4 do capítulo 3 (Metodologia).

Tabela 4.5: Atividades de ^{234}U nas amostras de fezes dos trabalhadores do Grupo 2, após o desconto da contribuição ambiental.

Código do trabalhador	Massa ^a (g cinza)	Amostras de fezes		
		Dias após o início da operação ^b	^{234}U (mBq/dia)	^{234}U (mBq/dia) líquido ^c
189	3,3	106	134,1	110,4
191	3,5	106	32,6	7,1
190	4,2	122	37,9	7,8
183	4,7	132	116,9	83,1
186	2,3	132	72,6	56,0
210	2,0	132	27,4	12,7

^a massas das amostras de fezes calcinadas

^b data da coleta das amostras de excreta em dias após o início do período de montagem do elemento combustível.

^c Concentrações de ^{234}U nas amostras de fezes após o desconto da contribuição ambiental

Das seis amostras analisadas, todas apresentaram concentração de ^{234}U nas fezes acima da contribuição ambiental.

A técnica de ICP-MS utilizada na análise das amostras de urina determina apenas a concentração de ^{238}U em massa e não tem sensibilidade para quantificar o ^{234}U , conforme descrito anteriormente. Como os dados de fezes indicam que houve exposição ocupacional a ^{234}U , utilizou-se a razão entre ^{238}U e ^{234}U encontrada nas fezes através da espectrometria alfa, para se estimar a atividade de ^{234}U na urina. Considerou-se ainda que a concentração de ^{234}U na urina de pessoas não ocupacionalmente expostas estava em equilíbrio com a de ^{238}U , ou seja, igual a 0,0916 mBq/L.

Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Atividades de ^{234}U nas amostras de urina dos trabalhadores do Grupo 2, após o desconto da contribuição ambiental.

Código do trabalhador	Dias após o início da operação ^a	Amostras de urina		
		^{234}U (mBq/L)	^{234}U (mBq/dia)	^{234}U (mBq/dia) líquido ^b
189	106	0,7	1,0	0,9
191	106	0,5	0,7	0,6
190	122	0,4	0,6	0,5
183	132	0,6	0,8	0,7
186	132	0,3	0,4	0,3
210	132	2,0	2,9	2,7

^a data da coleta das amostras de excreta em dias após o início do período de montagem do elemento combustível.

^b Concentrações de ^{238}U nas amostras de urina após o desconto da contribuição ambiental

Alguns autores não consideram a contribuição da exposição ambiental na interpretação dos dados de excreção urinária, pois em todos os estudos de exposição ambiental uma parcela significativa dos resultados encontra-se abaixo do limite de detecção. Neste trabalho, optou-se em descontar a contribuição da exposição ambiental para uniformizar o procedimento adotado para análise dos resultados de fezes e urina.

A Tabela 4.6 mostra que as concentrações de urânio nas amostras de urina do grupo de trabalhadores estão na mesma ordem de grandeza, indicando que os trabalhadores estão expostos a um mesmo tipo de composto, ou à mesma quantidade de urânio, com exceção do trabalhador 210.

c) Análise da razão urina:fezes

Foram calculadas as razões das concentrações de ^{238}U nas amostras de fezes e urina dos trabalhadores do Grupo 2 (urina:fezes) e em seguida as razões referentes ao ^{234}U . As Tabelas 4.7 e 4.8 apresentam as razões para concentrações de ^{238}U e ^{234}U de três formas:

- Sem o desconto da contribuição ambiental;
- Descontando-se a contribuição ambiental na urina e nas fezes; e
- Levando em consideração somente a contribuição ambiental nas amostras de fezes.

Tabela 4.7: Razão urina:fezes entre as concentrações de ^{238}U em amostras de 24 h dos trabalhadores do Grupo 2

Código do trabalhador	Dias após o início da operação ^a	Urina:fezes	Urina: fezes (líquido ^b)
189	106	$7,8 \times 10^{-03}$	$8,5 \times 10^{-03}$
191	106	$2,3 \times 10^{-02}$	-
190	122	$1,6 \times 10^{-02}$	-
183	132	$7,0 \times 10^{-03}$	-
186	132	$6,1 \times 10^{-03}$	-
210	132	$1,0 \times 10^{-01}$	-

^a data da coleta das amostras de excreta em dias após o início do período de montagem do elemento combustível.

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes;

Tabela 4.8: Razão urina:fezes entre as concentrações de ^{234}U em amostras de 24 h dos trabalhadores do Grupo 2.

Código do trabalhador	Dias após o início da operação ^a	Urina:fezes	Urina:fezes (líquido ^b)
189	106	$7,7 \times 10^{-03}$	$8,2 \times 10^{-03}$
191	106	$2,3 \times 10^{-02}$	$8,7 \times 10^{-02}$
190	122	$1,6 \times 10^{-02}$	$6,2 \times 10^{-02}$
183	132	$7,1 \times 10^{-03}$	$8,4 \times 10^{-03}$
186	132	$6,1 \times 10^{-03}$	$5,7 \times 10^{-03}$
210	132	$1,0 \times 10^{-01}$	$2,1 \times 10^{-01}$

^a data da coleta das amostras de excreta em dias após o início do período de montagem do elemento combustível.

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes;

Os trabalhadores 189, 183 e 186 apresentaram razões entre a concentração de urânio na urina e nas fezes na mesma ordem de grandeza, confirmando que houve incorporação do mesmo composto. As razões experimentais para os trabalhadores 191, 190 e 210 são diferentes do restante do grupo, de uma a duas ordens de grandeza. Isso ocorre porque a concentração de urânio nas fezes está próxima da contribuição ambiental. É difícil diferenciar a contribuição ambiental da ocupacional presente nas amostras de fezes, já que a concentração de urânio nas fezes varia muito com a dieta alimentar.

SIMULAÇÃO DO TIPO DE INCORPORAÇÃO

O processo de montagem do elemento combustível foi realizado na Unidade 1 da FCN no período de 04/01/2002 a 15/05/2002 (131 dias). Nesta etapa, o urânio utilizado na montagem do elemento combustível está sob a forma de pastilha sinterizada de dióxido de urânio (UO_2). Segundo a ICRP 68 (1994b), a ICRP 66 (1994) e o *Supporting Guidance 3* da ICRP (2003), o dióxido de urânio (UO_2) é classificado como composto insolúvel (tipo S).

A ICRP, em sua publicação “*Supporting Guidance 3*” (ICRP, 2003), apresenta parâmetros de retenção pulmonar específicos para o UO_2 , derivados de experimentos *in vivo* (Stradling e cols, 2002; Ansoborlo e cols, 2002), conforme descrito no Capítulo 2. Tais parâmetros indicam que o UO_2 é mais solúvel quando comparado aos compostos tipo S, segundo a classificação padrão da ICRP.

Neste trabalho, as razões experimentais foram comparadas com as razões derivadas a partir dos parâmetros de retenção das publicações da ICRP 66 (1994), do

Supporting Guidance 3 da ICRP (2003) e dos estudos *in vivo* disponíveis na literatura (Stradling e cols, 2002; Ansoborlo e cols, 2002). As razões entre as concentrações de urânio excretadas em urina e em fezes, derivadas a partir dos parâmetros sugeridos pela ICRP (2003) e pelos dados da literatura, serão chamadas de razões urina:fezes teóricas.

Para cada trabalhador, os valores experimentais das razões entre as concentrações de urânio excretadas em urina e em fezes foram comparados com os valores esperados para compostos padrão da ICRP, publicação 66 (ICRP1994), e para os parâmetros específicos para UO₂ urina:fezes teóricos. Utilizou-se o código computacional *Activity and Internal Dose Estimates – Versão 2 (AIDE-2)* para simular a incorporação de compostos de urânio com diferentes parâmetros de absorção do sistema respiratório para o sistema sanguíneo, que serão agora denominados compostos de diferentes “solubilidades”.

Foram testados os parâmetros de referência da ICRP, publicação 66 (1994), para os compostos tipos F, M e S, assim como para os parâmetros de absorção f_r , s_r e s_s , sugeridos na literatura científica para UO₂, conforme apresentado na Tabela 4.9. As definições de parâmetros de absorção f_r , s_r e s_s estão apresentados no Capítulo 2. O código computacional AIDE-2 fornece a taxa de excreção urinária e fecal (Bq/Bq incorporado) após a incorporação aguda de 1 Bq de urânio, ou após a incorporação crônica de 1 Bq por dia de urânio, em diferentes tempos durante e após a exposição.

Tabela 4.9: Parâmetros utilizados na simulação da incorporação de compostos de diferentes solubilidades.

Simulações	f_r	s_r	s_s
Tipo F	1	100	-
Tipo M	0,1	100	0,005
Tipo S	0,001	100	0,0001
ICRP 2003 ^a	0,03	1,25	0,0015
UO ₂ (UK) ^b	0,01	0,95	0,00061
UO ₂ (F) ^c	0,02	1,3	0,00086
UO ₂ (UK) ^b	0,01	1,3	0,00026

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio) (ICRP, 2003);

^b Stradling e cols., 2002;

^c Ansoborlo e cols., 2002;

ESTUDO DE CASOS

Para todos os trabalhadores da montagem do elemento combustível, foram considerados os seguintes cenários de incorporação:

- Crônica por inalação e ingestão durante o período de montagem do elemento combustível;
- Incorporação de curta duração (aguda), em data próxima à da coleta das amostras de excreta.

Para analisar melhor os dados e avaliar a exposição ocupacional na Unidade 1 da FCN, será analisado inicialmente o trabalhador que apresenta concentração positiva de ^{234}U nas fezes e na urina. Tal avaliação é importante porque esse trabalhador está exposto apenas a UO_2 , classificado pela ICRP, publicação 66 (ICRP1994) como um composto do tipo S.

- Caso 1: Avaliação da exposição do Trabalhador 189

- Período da fabricação e montagem do elemento combustível: 04/01/2002 a 15/05/2002 (131 dias);
- Data de coleta: 20/04/02 - Equivale a 106 dias após o início do período de exposição contínua.

Na Tabela 4.10 estão apresentadas as atividades de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e a razão das concentrações urina:fezes experimental, do trabalhador 189.

Tabela 4.10: Atividades de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 189, amostras coletadas em 20/04/02.

Código do trabalhador	Dias após o início da operação ^a	^{234}U		
		Fezes (mBq/dia)	Urina (mBq/dia)	Urina:Fezes Líquida ^b
189	106	110,4	0,9	$8,2 \times 10^{-03}$

^a data da coleta das amostras de excreta

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes.

Hipóteses testadas: As amostras foram coletadas 106 dias após o início da produção

a) *Primeira hipótese: Exposição crônica por inalação e/ou ingestão durante o período de montagem do elemento combustível:*

Tal hipótese considera que o trabalhador esteve exposto durante 105 dias – a coleta ocorreu no dia seguinte – a um composto de UO_2 , considerando a inalação como a principal via de incorporação e os diâmetros aerodinâmicos medianos das partículas inaladas iguais a $1 \mu m$ (DAMA).

As razões urina:fezes teóricas esperadas para diferentes tipos de parâmetros de absorção do modelo pulmonar descrito na publicação 66 da ICRP (1994), e conforme já especificado neste trabalho, estão apresentadas na Tabela 4.11. Observa-se que as razões teóricas para compostos tipo S e $UO_2(UK_2)$ estão próximos da razão experimental calculada em relação ao ^{234}U , indicando que pode ter ocorrido exposição crônica via inalação.

Tabela 4.11: Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua, durante 105 dias, de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão e coleta no dia seguinte.

Tipo de simulação	Urina	Fezes	Razão
Tipo F	$9,8 \times 10^{-02}$	$9,5 \times 10^{-02}$	$1,0 \times 10^{+00}$
Tipo M	$4,2 \times 10^{-02}$	$2,3 \times 10^{-01}$	$1,9 \times 10^{-01}$
Tipo S	$1,2 \times 10^{-03}$	$2,5 \times 10^{-01}$	$5,0 \times 10^{-03}$
ICRP 2003 ^a	$1,7 \times 10^{-02}$	$2,4 \times 10^{-01}$	$7,0 \times 10^{-02}$
$UO_2(UK)^b$	$6,1 \times 10^{-03}$	$2,5 \times 10^{-01}$	$2,4 \times 10^{-02}$
$UO_2(F)^c$	$8,8 \times 10^{-03}$	$2,5 \times 10^{-01}$	$3,5 \times 10^{-02}$
$UO_2(UK_2)^b$	$3,3 \times 10^{-03}$	$2,5 \times 10^{-01}$	$1,3 \times 10^{-02}$
Ingestão composto insolúvel	$1,1 \times 10^{-03}$	$9,0 \times 10^{-01}$	$1,2 \times 10^{-03}$

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003);

^b Stradling e cols., 2002;

^c Ansorbolo e cols., 2002;

b) *Segunda hipótese: Exposição de curta duração, via inalação, com incorporação substancialmente superior à incorporação crônica diária do trabalhador durante 106 dias:*

Pelo fato da amostra de fezes apresentar uma alta concentração de urânio, os dados indicam que a incorporação pode ter ocorrido isoladamente, e não de maneira crônica, diária. Neste caso, os dados experimentais são compatíveis com o modelo

teórico, quando assumimos que a amostra possa ter sido coletada num período de poucos dias após a incorporação de UO_2 , como mostra a Tabela 4.12.

Tabela 4.12: Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção, e incorporação via ingestão, considerando-se a incorporação de curta duração, e coleta de fezes e urina até 5 dias após a exposição.

Tipo de Simulação	Urina/fezes (1º. dia)	Urina/fezes (2º. dia)	Urina/fezes (3º. dia)	Urina/fezes (5º. dia)
Tipo M	$3,3 \times 10^{-01}$	$1,3 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$
Tipo S	$7,2 \times 10^{-03}$	$3,9 \times 10^{-4}$	$4,9 \times 10^{-4}$	$2,3 \times 10^{-3}$
UO_2 ICRP 2003 ^a	$7,5 \times 10^{-02}$	$1,1 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$3,3 \times 10^{-2}$
UO_2 (UK) ^b	$1,3 \times 10^{-02}$	$3,4 \times 10^{-3}$	$3,5 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-2}$
UO_2 UO_2 (F) ^c	$2,3 \times 10^{-02}$	$5,9 \times 10^{-3}$	$4,9 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-2}$
UO_2 (UK) ^b	$1,4 \times 10^{-02}$	$2,9 \times 10^{-3}$	$2,3 \times 10^{-3}$	$6,3 \times 10^{-3}$
Ingestão composto insolúvel	$4,5 \times 10^{-03}$	$1,8 \times 10^{-4}$	$1,9 \times 10^{-4}$	$9,6 \times 10^{-4}$

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003);

^b Stradling e cols., 2002;

^c Ansorbolo e cols, 2002;

Ao se comparar as razões teóricas com a razão experimental, observa-se compatibilidade com:

- Incorporação por inalação de um composto tipo M, com ou sem contribuição da ingestão, considerando que para as amostras de fezes e urina foram coletadas 2 a 5 dias após a incorporação de UO_2 ;
- Incorporação por inalação de um composto tipo S, com ou sem contribuição da ingestão, considerando que para as amostras de fezes e urina foram coletadas um dia após a incorporação de UO_2 ;
- Incorporação por inalação de compostos tipo UO_2 (UK) ou UO_2 (UK₂), considerando que as amostras foram coletadas cinco dias após a incorporação de UO_2 .

Conclusão:

Pelo fato da amostra de fezes apresentar uma alta concentração de urânio, há indicativo de que tenha ocorrido incorporação eventual por inalação de um composto com o comportamento padrão tipo S, e que a amostra tenha sido coletada um dia após a

incorporação. O composto poderia ainda ter sido caracterizado como tendo “solubilidade” tipo $UO_2(UK)$ ou $UO_2(UK_2)$, com coleta realizada cinco dias após a incorporação. Como na Unidade 1 da FCN ocorre a montagem do elemento combustível, e a pastilha está na forma de UO_2 sinterizada, é difícil que ocorra incorporação crônica por inalação durante todos os dias de funcionamento da fábrica.

Caso 2: Avaliação da exposição do trabalhador 191

- Período da fabricação e montagem do elemento combustível: 04/01/2002 a 15/05/2002 (131 dias);
- Data de coleta: 20/04/02 - Equivale a 106 dias após o início do período de exposição contínua.

Para este segundo trabalhador, a atividade de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e a razão urina:fezes experimental estão apresentadas na Tabela 4.13. A metodologia de avaliação da via de incorporação foi a mesma utilizada na análise do caso 1. A descrição detalhada desta avaliação encontra-se no Anexo A.1.

Tabela 4.13: Atividades de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 191, amostras coletadas em 20/04/02.

Código do trabalhador	Dias após o início da operação ^a	^{234}U		
		Fezes (mBq/dia)	Urina (mBq/dia)	Urina:Fezes líquida ^b
191	106	7,2	0,6	$8,6 \times 10^{-2}$

^a data da coleta das amostras de excreta

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes.

a) Primeira hipótese: Exposição crônica por inalação e/ou ingestão durante o período de montagem do elemento combustível:

Nesta primeira hipótese, observa-se que a razão experimental, calculada em relação ao ^{234}U , está na mesma ordem de grandeza que a simulação de incorporação de UO_2 (ICRP 2003) indicando que poderia ter ocorrido exposição crônica via inalação.

b) Segunda hipótese: Exposição de curta duração, via inalação, com incorporação substancialmente superior à incorporação crônica diária que o trabalhador poderia ter durante os 106 dias:

Nesta segunda hipótese, a razão urina:fezes experimental, ao ser comparada com as razões teóricas, indica que as amostras de fezes e urina foram provavelmente coletadas um dia após uma incorporação por inalação de UO_2 (ICRP 2003). O fato da amostra de fezes apresentar uma baixa concentração de urânio, próxima à contribuição ambiental, dificulta afirmar se realmente ocorreu incorporação por inalação de UO_2 com os parâmetros de retenção pulmonar do *Supporting Guidance 3* (ICRP, 2003). Outro fato que dificulta a análise é que a concentração de urânio na urina está na mesma ordem de grandeza da dos outros trabalhadores da Unidade 1, expostos a UO_2 na forma sinterizada, caracterizado como composto tipo S, padrão da ICRP (1994).

- Caso 3: Avaliação da exposição do trabalhador 183

- Período da fabricação e montagem do elemento combustível: 04/01/2002 a 15/05/2002 (131 dias);
- Data de coleta: 13/05/02 - Equivale a 132 dias após o início do período de exposição contínua.

Para este terceiro trabalhador, a atividade de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental estão apresentadas na Tabela 4.14. A metodologia de avaliação da via de incorporação foi a mesma utilizada na análise do caso 1. A descrição detalhada desta avaliação encontra-se no Anexo A.2.

Tabela 4.14: Atividades de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 183, amostras coletadas em 13/05/02.

Código do trabalhador	Dias após o início da operação ^a	^{234}U		
		Fezes (mBq/dia)	Urina (mBq/dia)	Urina:Fezes Líquida ^b
183	132	83,1	0,7	$8,4 \times 10^{-03}$

^a data da coleta das amostras de excreta

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes.

a) *Primeira hipótese: Exposição crônica por inalação e/ou ingestão durante o período de montagem do elemento combustível:*

Nesta primeira hipótese, observa-se que os valores das razões teóricas para compostos do Tipo S e a razão experimental estão próximos. Estes resultados indicam

que pode ter ocorrido exposição crônica via inalação de um composto de urânio insolúvel do Tipo S.

b) Segunda hipótese: Exposição de curta duração, via inalação, com incorporação substancialmente superior à incorporação crônica diária que o trabalhador poderia ter durante os 131 dias:

Nesta segunda hipótese, os dados experimentais são compatíveis com o modelo teórico, quando assumimos que a amostra tenha sido coletada num período de poucos dias após a incorporação de UO_2 .

Ao comparar as razões teóricas com a razão experimental, observa-se compatibilidade com:

- Incorporação por inalação de um composto tipo S, com ou sem contribuição da ingestão, considerando que as amostras de fezes e urina foram coletadas um dia após a incorporação de UO_2 ;
- Incorporação por inalação de compostos tipo $UO_2(UK)$ ou $UO_2(UK_2)$, para amostras de fezes e urina, considerando que foram coletadas cinco dias após a incorporação de UO_2 .

Pelo fato da amostra de fezes apresentar uma alta concentração de urânio, há indicativo de que tenha ocorrido incorporação eventual por inalação de um composto com o comportamento padrão tipo S, e que a amostra tenha sido coletada um dia após a incorporação. O composto poderia ainda ter sido caracterizado como tendo “solubilidade” tipo $UO_2(UK)$ ou $UO_2(UK_2)$, com coleta realizada 5 dias após a incorporação. Como na Unidade 1 da FCN ocorre a montagem do elemento combustível, e a pastilha está na forma de UO_2 sinterizada, é difícil que ocorra incorporação crônica por inalação durante todos os dias de funcionamento da fábrica.

- Caso 4: Avaliação da exposição do trabalhador 186

- Período da fabricação e montagem do elemento combustível: 04/01/2002 a 15/05/2002 (131 dias);
- Data de coleta: 13/05/02 - Equivale a 132 dias após o início do período de exposição contínua.

Para este quarto trabalhador, a atividade de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental encontram-se na Tabela 4.15. A metodologia de avaliação da via de incorporação foi a mesma utilizada na análise do caso 1. A descrição detalhada desta avaliação encontra-se no Anexo A.3.

Tabela 4.15: Atividades de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 186, amostras coletadas em 13/05/02.

Código do trabalhador	Dias após o início da operação ^a	^{234}U		
		Fezes (mBq/dia)	Urina (mBq/dia)	Urina:Fezes líquida ^b
186	132	56	0,3	$5,7 \times 10^{-03}$

^a data da coleta das amostras de excreta

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes.

a) Primeira hipótese: Exposição crônica por inalação e/ou ingestão durante o período de montagem do elemento combustível:

Nesta primeira hipótese, observa-se que os valores das razões teóricas para compostos tipo S e a razão experimental estão próximos. Esses resultados indicam que pode ter ocorrido exposição crônica via inalação de um composto de urânio insolúvel do Tipo S.

b) Segunda hipótese: Exposição de curta duração, via inalação, com incorporação substancialmente superior à incorporação crônica diária que o trabalhador poderia ter durante os 131 dias:

Nesta segunda hipótese, os dados experimentais são compatíveis com o modelo teórico, quando assumimos que a amostra tenha sido coletada num período de poucos dias após a incorporação de UO_2 .

Ao comparar as razões teóricas com a razão experimental, observa-se compatibilidade com:

- Incorporação por inalação de um composto tipo S, com ou sem contribuição da ingestão, considerando que as amostras de fezes e urina foram coletadas 1 dia após a incorporação de UO_2 ;
- Incorporação por inalação de compostos tipo $\text{UO}_2(\text{UK})$ ou $\text{UO}_2(\text{F})$, para amostras de fezes e urina, considerando que foram coletadas dois ou três dias após a incorporação de UO_2 .

- Incorporação por inalação de $UO_2(UK2)$ para amostras de fezes e urina, considerando que foram coletadas cinco dias após a incorporação de UO_2 .

- Caso 5: Avaliação da exposição do trabalhador 210

- Período da fabricação e montagem do elemento combustível: 04/01/2002 a 15/05/2002 (131 dias);
- Data de coleta: 13/05/02 - Equivale a 132 dias após o início do período de exposição contínua.

Para este quinto trabalhador, as atividades de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental estão apresentadas na Tabela 4.16. A metodologia de avaliação da via de incorporação foi a mesma utilizada na análise do caso 1. A descrição detalhada desta avaliação encontra-se no Anexo A.4.

Tabela 4.16: Atividades de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 210, amostras coletadas em 13/05/02.

Código do trabalhador	Dias após o início da operação ^a	^{234}U		
		Fezes (mBq/dia)	Urina (mBq/dia)	Urina:Fezes Líquida ^b
210	132	12,7	2,7	$2,1 \times 10^{-01}$

^a data da coleta das amostras de excreta

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes.

a) Primeira hipótese: Exposição crônica por inalação e/ou ingestão durante o período de montagem do elemento combustível:

Na primeira hipótese, observa-se que a razão experimental, calculada em relação ao ^{234}U , está na mesma ordem de grandeza que a simulação de incorporação de um composto com os parâmetros de retenção pulmonar de um composto tipo M, indicando a possibilidade de exposição crônica via inalação.

b) Segunda hipótese: Exposição de curta duração, via inalação, com incorporação substancialmente superior à incorporação crônica diária que o trabalhador poderia ter durante os 131 dias:

Nesta segunda hipótese, os resultados indicam que poderia ter ocorrido exposição de curta duração, via inalação de um composto de urânio do Tipo M, com coleta de amostras um dia após a exposição

O fato da amostra de fezes apresentar uma baixa concentração de urânio, próxima à contribuição ambiental, dificulta afirmar se realmente ocorreu incorporação por inalação de UO_2 com os parâmetros de retenção pulmonar do tipo M. A razão urina:fezes é mais alta que as razões encontradas nos outros casos. A concentração de ^{234}U na urina é muito maior que a concentração no restante do grupo. É difícil que tenha ocorrido incorporação de um composto tipo M, uma vez que nessa Unidade 1 da FCN só se trabalha com UO_2 sinterizado.

4.1.3 – CÁLCULO DA ATIVIDADE INCORPORADA E DA DOSE EFETIVA COMPROMETIDA

Para todos os trabalhadores estudados foi calculada a atividade incorporada e a dose efetiva comprometida, considerando-se a hipótese de incorporação de curta duração via inalação já que na Unidade 1 da FCN ocorre a montagem do elemento combustível. Nessa etapa a pastilha está na forma de UO_2 sinterizada e é difícil que ocorra incorporação crônica por inalação durante todos os dias de funcionamento da fábrica. Para todos os casos, as atividades incorporadas e as doses efetivas foram calculadas utilizando-se os resultados das excreções urinária e fecal e os modelos teóricos que se mostraram compatíveis com os dados experimentais.

A Tabela 4.17 apresenta os resultados das atividades incorporadas (Bq) e das doses efetivas (Sv) para cada caso avaliado.

Tabela 4.17: Atividade incorporada e dose efetiva para os trabalhadores da Unidade 1 utilizando os resultados de excreção urinária e fecal

Código do Trabalhador	Simulação	Excreção	Atividade Incorporada (Bq)	Dose Efetiva (Sv)
189	S	urinária	2,1	$1,7 \times 10^{-5}$
		fecal	1,8	$1,5 \times 10^{-5}$
	UO ₂ (UK)	urinária	10,0	$5,8 \times 10^{-5}$
		fecal	13,1	$7,6 \times 10^{-5}$
	UO ₂ (UK2)	urinária	17,0	$1,2 \times 10^{-4}$
		fecal	13,1	$9,2 \times 10^{-5}$
191	UO ₂ (ICRP 2003)	urinária	0,1	$6,2 \times 10^{-7}$
		fecal	0,1	$5,4 \times 10^{-7}$
183	S	urinária	1,6	$1,3 \times 10^{-5}$
		fecal	1,4	$1,2 \times 10^{-5}$
	UO ₂ (UK)	urinária	7,7	$4,5 \times 10^{-5}$
		fecal	9,9	$5,7 \times 10^{-5}$
	UO ₂ (UK2)	urinária	13,1	$9,2 \times 10^{-5}$
		fecal	9,9	$6,9 \times 10^{-5}$
186	S	urinária	0,7	$6,2 \times 10^{-6}$
		fecal	0,9	$7,8 \times 10^{-6}$
	UO ₂ (F)	urinária	1,4	$7,3 \times 10^{-6}$
		fecal	1,2	$6,3 \times 10^{-6}$
	UO ₂ (UK)	urinária	2,0	$1,1 \times 10^{-5}$
		fecal	1,2	$7,0 \times 10^{-6}$
	UO ₂ (UK2)	urinária	6,0	$4,2 \times 10^{-5}$
		fecal	6,6	$4,7 \times 10^{-5}$

Observa-se na Tabela 4.1.7 que para quase todos os casos, os valores de incorporação e de dose efetiva calculados a partir da excreção urinária estão próximos dos valores de incorporação e de dose efetiva calculados a partir da excreção fecal, para um mesmo modelo teórico aplicado.

Os resultados da Tabela 4.17 apresentam valores mais baixos quando consideramos que o composto incorporado foi tipo S. Supondo que o UO₂ esteja na

forma mais solúvel, a atividade incorporada e a dose efetiva apresentam valores maiores.

A Dose Efetiva Comprometida calculada a partir dos resultados da excreção urinária variam de $6,2 \times 10^{-7}$ a $9,2 \times 10^{-5}$ Sv. Esses valores são menores que o limite de dose para o público (1mSv).

No caso do trabalhador 189 observa-se que a Dose Efetiva Comprometida supondo-se incorporação de $UO_2(UK_2)$ é uma ordem de grandeza maior que quando supõe-se a incorporação de um composto Tipo S ou $UO_2(UK)$.

No caso do trabalhador 183 observa-se também que a Dose Efetiva Comprometida considerando-se incorporação de UK_2 é quase 1 ordem de grandeza maior que quando supõe-se a incorporação de um composto Tipo S.

Essas observações reforçam a necessidade de se realizar estudos de solubilidades específicos para o material manipulado na Fábrica de Elemento Combustível.

4.2 – UNIDADE 2 DA FCN

Os trabalhadores desta Unidade estão expostos a diferentes compostos durante o processo de fabricação das pastilhas de UO_2 .

Como foi descrito no Capítulo 2, na Unidade 2 ocorre a reconversão de UF_6 em pó de UO_2 , e a fabricação de pastilhas de UO_2 para utilização como combustível nuclear. A principal matéria-prima desta etapa do processo é o urânio enriquecido na forma de hexafluoreto de urânio (UF_6). A hidrólise do UF_6 e a precipitação do tricarbonato de amônio e uranila (TCAU) ocorrem em um reator químico despressurizado. O TCAU é um composto sólido, amarelo e pouco solúvel em água. A decomposição térmica do TCAU e subsequente redução para UO_2 processa-se em forno de leito fluidizado. Essas etapas do processo são realizadas em ambientes de trabalho interligados, e os trabalhadores circulam em todas as áreas. O UO_2 é transportado para grandes recipientes giratórios (homogeneizadores), onde é adicionado o U_3O_8 . Essa mistura é transportada pneumáticamente para uma prensa rotativa automática, onde são produzidas as pastilhas.

As "pastilhas verdes", ainda relativamente frágeis, são encaminhadas ao forno de sinterização. O sistema de retificação de pastilhas de UO_2 é constituído por um dispositivo de alimentação contínua de pastilhas, um equipamento de retificação, uma seção de controle dimensional e inspeção visual, e um dispositivo de retirada e arrumação de pastilhas sinterizadas. A prensa, o forno de sinterização e a retífica, que fazem parte do processo de fabricação de pastilha, estão em locais próximos uns dos outros, porém separados do processo de reconversão.

As pastilhas, após aprovação nos testes dimensionais, metalográficos e químicos pertinentes, estarão aptas a serem utilizadas como elementos combustíveis. Tais testes são realizados em laboratórios ainda na Unidade 2 da FCN, porém separados do processo de reconversão e fabricação das pastilhas (www.inb.gov.br).

Durante o ano de 2002, a montagem do elemento combustível foi realizada na Unidade 2 da FCN nos seguintes períodos:

- Fabricação do pó de UO_2 : 09/01/2002 a 22/12/2002 (347 dias);
- Fabricação da pastilha: 19/01/2002 a 28/03/2002 (68 dias).

4.2.1 – BIOANÁLISE *IN VIVO*

Os trabalhadores da Unidade 2 da FCN foram monitorados no Contador de Corpo Inteiro do IRD/CNEN, para determinação das atividades de ^{238}U e ^{235}U nos pulmões. Todos os trabalhadores monitorados tiveram os resultados menores que os limites mínimos de detecção, que são 46 Bq para ^{238}U e 6,5 Bq para ^{235}U (Azeredo e cols, 2003).

4.2.2 – BIOANÁLISE *IN VITRO*

4.2.2.1 – ANÁLISE DOS DADOS DE BIOANÁLISE *IN VITRO* DO GRUPO DE TRABALHADORES DA PRODUÇÃO DE PASTILHAS (PENEIRAMENTO, PRENSA, SINTERIZAÇÃO E RETÍFICA)

Como pode ser observado nas Tabelas 4.18, 4.19 e 4.20 e 4.21, os dados de concentração de urânio nas amostras de fezes e urina dos trabalhadores apresentam uma variação muito grande quando analisados como um todo. As concentrações de urânio encontradas nas amostras de urina variam de menor que o limite de detecção (0,061 mBq/L) até 1 mBq/L. As concentrações de urânio presentes nas amostras de fezes variam de 2,5 mBq/dia até 399 mBq/dia para o ^{238}U , e de 2,7 mBq/dia até 2190 mBq/dia para ^{234}U . Inicialmente, separou-se os dados conforme o período de coleta e a atividade exercida por cada trabalhador.

Tabela 4.18: Resultados das atividades de urânio nas amostras de fezes e urina de trabalhadores da Unidade 2. Amostras coletadas em março de 2002, com a fábrica em funcionamento.

Código do trabalhador	Função	Dias após o início da operação ^a	Massa ^b (g cinza)	^{238}U fezes (mBq/dia)	^{234}U fezes (mBq/dia)	$^{238}\text{U}/^{234}\text{U}$ fezes	^{238}U (mBq/L) urina
256	Retífica	50 ^c	1,8	35,3±7,0	41,9±6,9	0,8	0,1

^a data da coleta das amostras de excreta

^b massa da amostra de fezes calcinadas

^c amostra coletada no domingo.

Tabela 4.19: Resultados das atividades de urânio nas amostras de fezes e urina de trabalhadores da Unidade 2, amostras coletadas em abril de 2002.

Código do trabalhador	Função	Dias após término da operação ^a	Massa ^b (g cinza)	²³⁸ U fezes (mBq/dia)	²³⁴ U fezes (mBq/dia)	²³⁸ U/ ²³⁴ U fezes	²³⁸ U (mBq/L) urina
146	Prensa	10	1,4	114,7 ± 11,7	572,2±49,4	0,2	0,2
136	Prensa	10	8,8	41,0 ± 12,1	49,0±39,68	0,8	<LMD
215	Retífica	31	3,1	20,4 ± 4,8	54,7 ± 8,6	0,4	0,5
135	Retífica	10	2,5	11,9 ± 4,0	24,1 ± 5,7	0,5	0,1
176	Retífica	10	1,8	12,4 ± 3,6	18,6 ± 4,3	0,7	0,7
213	Retífica	31	1,3	3,1±1,2	3,4±1,3	0,9	<LMD
235	Retífica	27	5,9	33,4±7,1	40,2±7,9	0,8	<LMD
164	Forno sinterização	18	4,05	16,9 ± 5,8	30,4 ± 7,7	0,6	0,3
174	Forno sinterização	17	4,9	99,4 ± 14,3	107,4 ± 15,0	0,9	0,7
147	Forno sinterização	10	2,3	6,1±2,5	7,5±2,7	0,8	<LMD
175	Forno sinterização	17	1,4	13,8±2,8	15,4±3,0	0,9	0,1
141	Peneiramento	78 ^c	1,8	74,0±11,1	199,8±30,0	0,4	0,5

^a data da coleta das amostras de excreta

^b massas das amostras de fezes calcinadas

^c Dias após o início da operação

Tabela 4.20: Resultados das atividades de urânio nas amostras de fezes e urina de trabalhadores da Unidade 2, amostras coletadas em maio de 2002.

Código do trabalhador	Função	Dias após término da operação ^a	Massa ^b (g cinza)	²³⁸ U fezes (mBq/dia)	²³⁴ U fezes (mBq/dia)	²³⁸ U/ ²³⁴ U fezes	²³⁸ U (mBq/L) urina
232	Prensa	36	1,6	9,9 ± 2,4	22,3 ± 3,7	0,4	0,2
219	Retífica	34	2,4	24,2 ± 4,4	46,6 ± 6,3	0,5	0,1
216	Retífica	52	2,0	10,2 ± 2,9	19,3 ± 4,0	0,5	0,2
264	Retífica	38	4,0	17,5 ± 4,0	22,5 ± 4,5	0,8	0,1
245	Retífica	45	1,2	9,0 ± 1,8	34,1 ± 4,0	0,3	<LMD
220	Retífica	52	1,9	5,6 ± 2,7	16,3 ± 5,0	0,3	-
234	Forno sinterização	38	8,3	85,0±12,7	98,2±14,3	0,9	<LMD
244	Forno sinterização	46	0,7	2,8±0,9	3,0±0,9	0,9	0,1

^a data da coleta das amostras de excreta

^b massas das amostras de fezes calcinadas

Tabela 4.21: Resultados das atividades de urânio nas amostras de fezes e urina de trabalhadores da Unidade 2, amostras coletadas nos meses de junho, agosto e dezembro de 2002.

Código do trabalhador	Função	Dias após término da operação ^a	Massa ^b (g cinza)	²³⁸ U fezes (mBq/dia)	²³⁴ U fezes (mBq/dia)	²³⁸ U/ ²³⁴ U fezes	²³⁸ U (mBq/L) urina
270	Prensa	134	1,3	11,5 ± 1,7	21,2 ± 2,5	0,5	0,1
260	Prensa	133	0,5	3,4 ± 1,4	5,5 ± 1,7	0,6	<LMD
275	Retífica	141	2,4	34,7 ± 5,8	69,7 ± 9,2	0,5	0,1
273	Retífica	255	0,7	2,5 ± 1,0	5,0 ± 1,3	0,5	0,1
267	Retífica	131	4,2	8,5 ± 3,5	14,5 ± 4,4	0,6	<LMD
271	Forno de Sinterização	72	1,5	5,0 ± 1,3	14,6 ± 2,3	0,3	<LMD
276	Peneiramento	201 ^c	1,2	19,3 ± 2,8	54,1 ± 5,7	0,4	0,1

^a data da coleta das amostras de excreta

^b massas das amostras de fezes calcinadas

^c Dias após o início da operação

As concentrações mais elevadas de urânio em amostras de urina e de fezes dos trabalhadores da produção de pastilhas correspondem a amostras que foram coletadas no mês de abril, logo após o período de produção de pastilhas. Isso é esperado, uma vez que o processo de produção de pastilhas ocorreu no período entre 19/01/2002 e 28/03/2002. A amostra correspondente ao mês de março foi coletada em um fim de semana, quando são esperadas concentrações menores de urânio em amostras de excreta do que durante a semana de trabalho.

Os resultados das análises das concentrações de urânio nas amostras de urina e fezes podem ser visualizados nas Figuras 4.4, 4.5 e 4.6. Os três gráficos podem ser comparados às concentrações de urânio em urina e fezes esperadas teoricamente para trabalhadores expostos cronicamente, durante 68 dias, a compostos de urânio tipo S, mostrados nas Figuras 4.7 e 4.8.

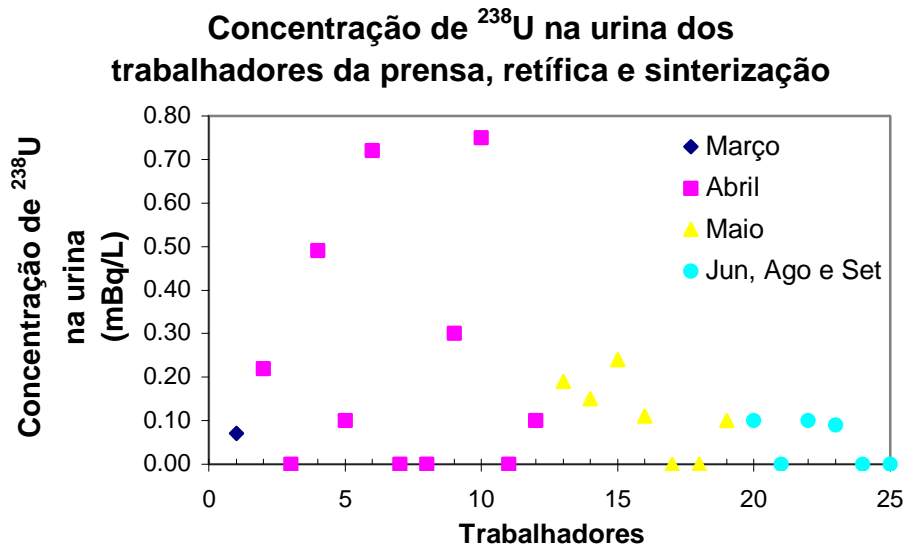


Figura 4.4: Concentrações de ^{238}U nas amostras de urina dos trabalhadores da produção de pastilhas, coletadas nos meses de março, abril, maio, junho, agosto e setembro

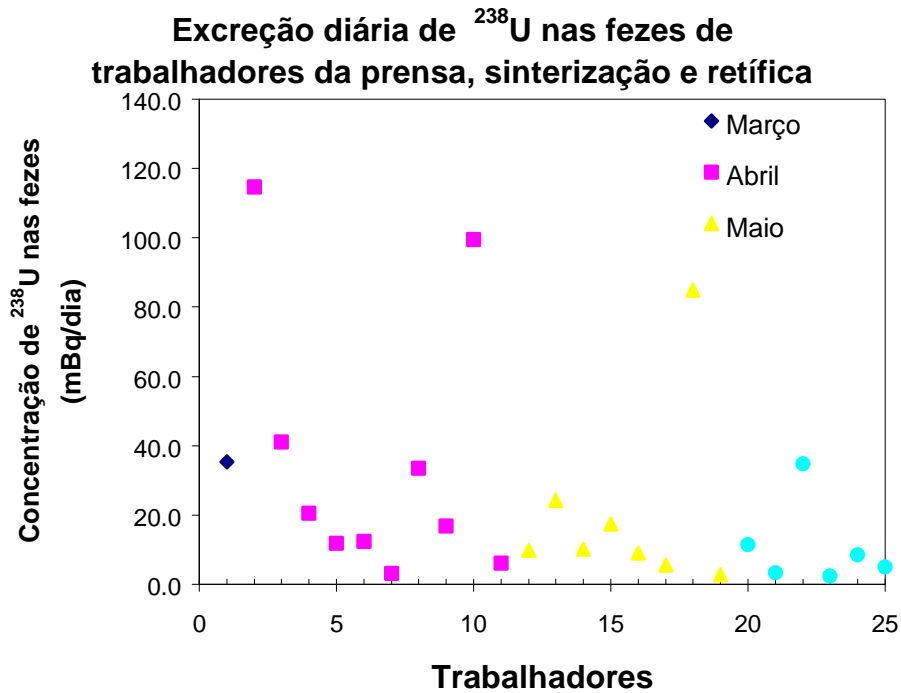


Figura 4.5: Concentrações de ^{238}U nas amostras de fezes dos trabalhadores da produção de pastilha coletadas nos meses de março, abril, maio, junho, agosto e setembro

Excreção diária de ^{234}U nas fezes de trabalhadores da prensa, retífica e sinterização

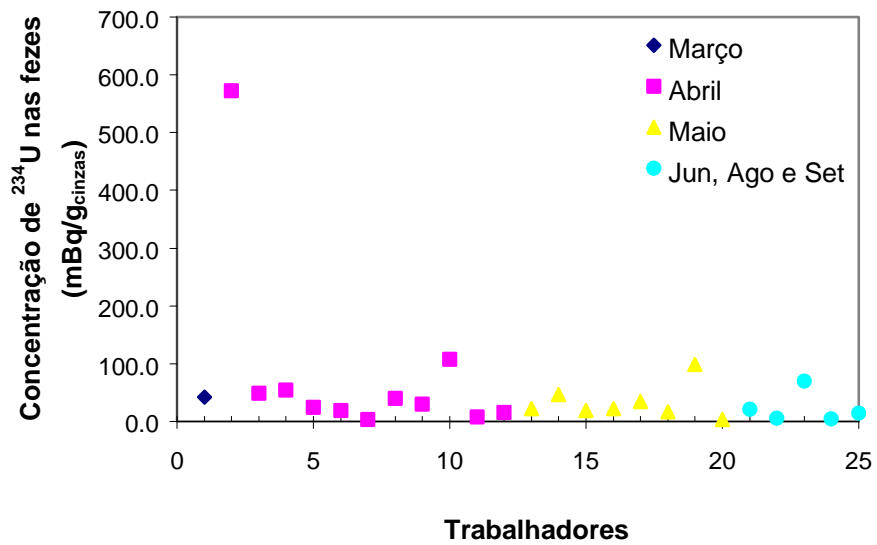


Figura 4.6: Concentrações de ^{234}U em amostras de fezes dos trabalhadores da produção de pastilhas, coletadas nos meses de abril, maio, junho, agosto e setembro.

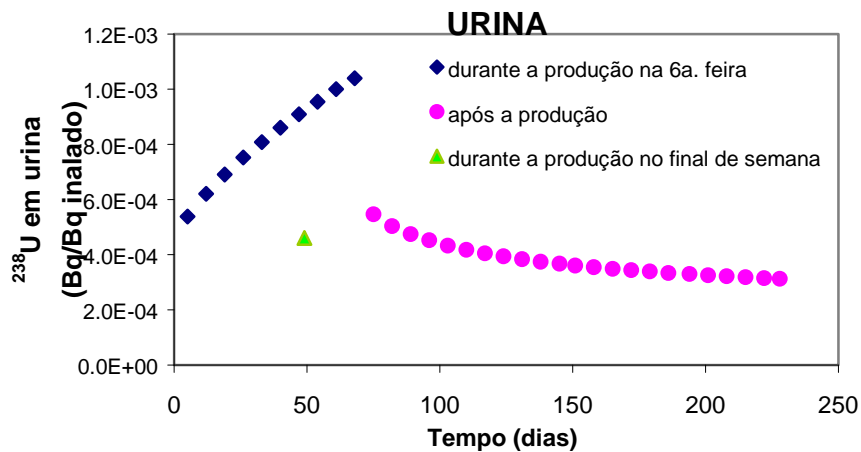


Figura 4.7: Concentrações teóricas de ^{238}U nas amostras de urina dos trabalhadores, coletadas durante o período de exposição de 68 dias, e após o período de exposição.

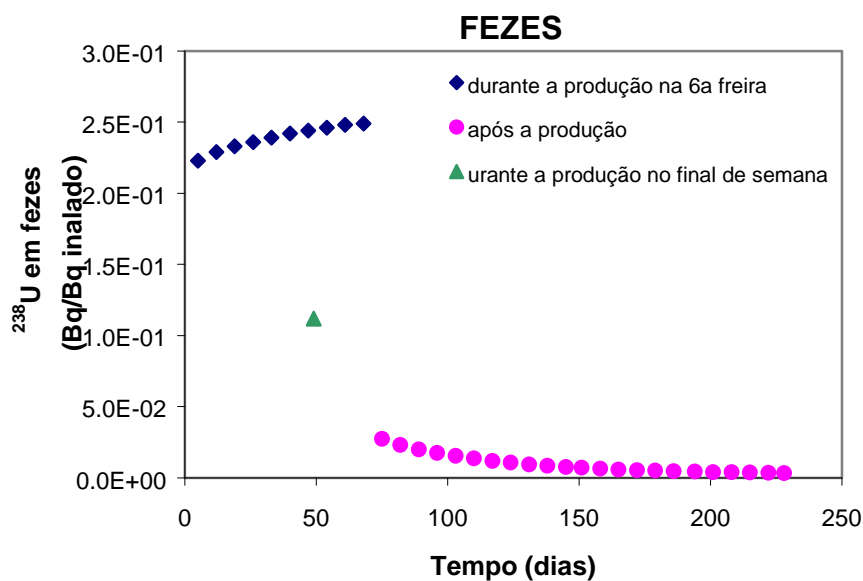


Figura 4.8: Concentrações teóricas de ^{238}U nas amostras de fezes dos trabalhadores coletadas durante o período de exposição de 68 dias e após o período de exposição.

Os resultados das concentrações de urânio das amostras de fezes e urina do trabalhador do peneiramento podem ser visualizados nas Figuras 4.9, 4.10 e 4.11. Como as amostras de urina e fezes desse trabalhador foram coletadas durante o período de funcionamento desta etapa do processo (09/01/2002 a 22/12/2002), foi feito um gráfico em separado mostrando as concentrações de urânio nas amostras de fezes e urina.

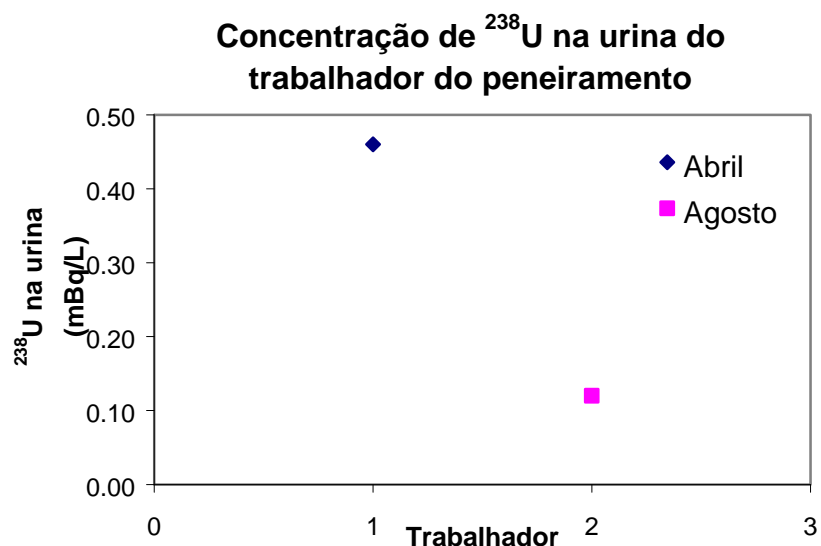


Figura 4.9: Concentrações de ^{238}U nas amostras de urina do trabalhador do peneiramento, coletadas nos meses de abril e agosto.

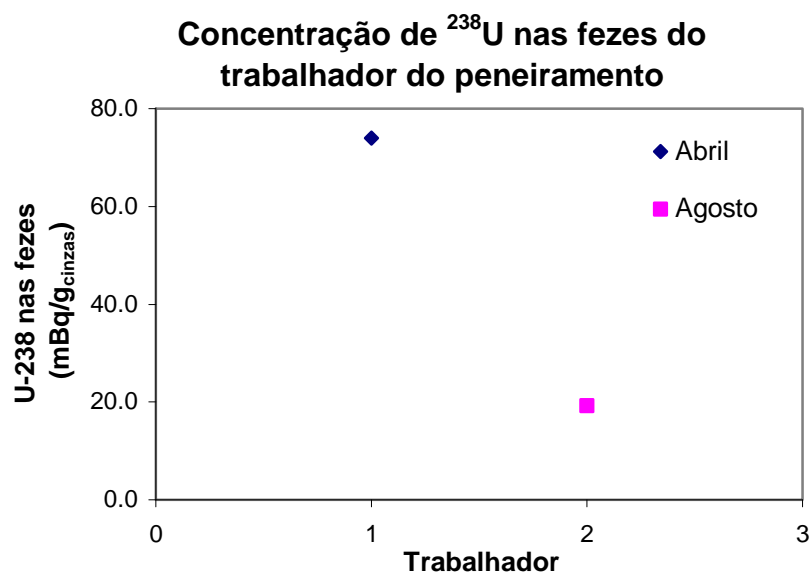


Figura 4.10: Concentrações de ^{238}U nas amostras de fezes do trabalhador do peneiramento, coletadas nos meses de abril e agosto.

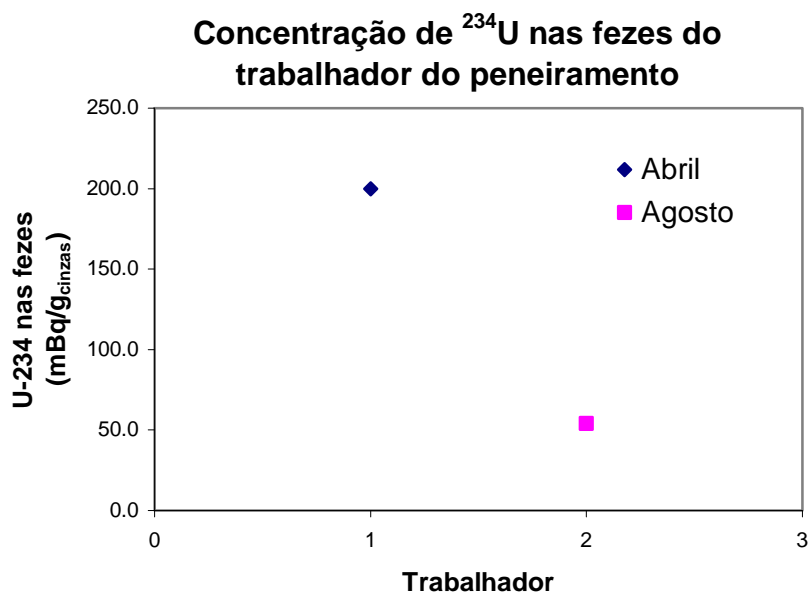


Figura 4.11: Concentrações de ^{234}U nas amostras de fezes do trabalhador do peneiramento, coletadas nos meses de abril e agosto.

Como o urânio manipulado na Unidade 2 da FCN é urânio enriquecido, e como o desequilíbrio isotópico com razão $^{238}\text{U}/^{234}\text{U}$ menor que 0,6 é característico de exposição a urânio enriquecido, os trabalhadores foram subdivididos em dois grupos: Grupos 1 e 2.

- **Grupo 1**

Foram incluídos neste grupo os trabalhadores cujas amostras de fezes continham concentrações de ^{238}U e ^{234}U com razão $^{238}\text{U}/^{234}\text{U}$ maior que 0,6. Os dados relativos às concentrações de urânio nas amostras de excreta deste grupo de trabalhadores estão apresentados na Tabela 4.22.

- **Grupo 2**

Foram incluídos neste grupo os trabalhadores cujas amostras de fezes continham concentrações de urânio em desequilíbrio isotópico entre o ^{238}U e ^{234}U com razão $^{238}\text{U}/^{234}\text{U}$ menor que 0,6. Os dados relativos às concentrações de urânio nas amostras de excreta deste grupo de trabalhadores estão apresentados na Tabela 4.23.

A razão isotópica ($^{238}\text{U}/^{234}\text{U}$) em amostras de fezes dos trabalhadores do Grupo 2 é um indicativo importante da exposição ocupacional. Já os trabalhadores do Grupo 1, apesar de não apresentarem tal indicador, poderiam não ter sido expostos ou poderiam ter sido expostos a níveis inferiores aos do Grupo 2, em concentrações não mais detectáveis em amostras de fezes por ocasião da coleta de amostras.

A partir dos dados mostrados na Tabela 4.22, calculou-se a média geométrica das concentrações de ^{238}U nas amostras de urina dos trabalhadores do Grupo 1. O valor encontrado foi 0,0958 mBq/L. Este valor está bem próximo da média geométrica obtida para o grupo não ocupacionalmente exposto (0,0916 mBq/L), formado por moradores da cidade do Rio de Janeiro.

Tabela 4.22: Atividades de urânio nas amostras de fezes e urina dos trabalhadores da Unidade 2 classificados no **Grupo 1**.

Código do trabalhador	Função	Dias após término da operação ^a	Massa ^b (g cinza)	²³⁸ U fezes (mBq)	²³⁴ U fezes (mBq)	²³⁸ U/ ²³⁴ U fezes	²³⁸ U (mBq/L) urina
256	Retífica		1,8	35,3±7,0	41,9±6,9	0,8	0,1
136	Prensa	10	8,8	41,0 ± 12,1	49,0 ± 39,7	0,8	<LMD
176	Retífica	10	1,8	12,4 ± 3,6	18,6 ± 4,3	0,7	0,7
213	Retífica	31	1,3	3,1±1,2	3,4±1,3	0,9	<LMD
235	Retífica	27	5,9	33,4±7,1	40,2±7,9	0,8	<LMD
174	Forno sinterização	17	4,9	99,4 ± 14,3	107,4 ± 15,0	0,9	0,7
147	Forno sinterização	10	2,3	6,11±2,5	7,5±2,7	0,8	<LMD
175	Forno sinterização	17	1,4	13,80±2,8	15,4±3,0	0,9	0,1
174	Forno sinterização	17	4,9	99,4 ± 14,3	107,4 ± 15,0	0,9	0,7
264	Retífica	38	4,0	17,5 ± 4,0	22,5 ± 4,5	0,8	0,1
234	Forno sinterização	38	8,3	85,0±12,7	98,2±14,3	0,9	<LMD
244	Forno sinterização	46	0,7	2,8±0,9	3,0±0,9	0,9	0,1

^a data da coleta das amostras de excreta

^b massas das amostras de fezes calcinadas

Tabela 4.23: Atividades de urânio nas amostras de fezes e urina dos trabalhadores da Unidade 2 classificados no **Grupo 2**.

Código do trabalhador	Função	Dias após término da operação ^a	Massa ^b (g cinza)	²³⁸ U fezes (mBq)	²³⁴ U fezes (mBq)	²³⁸ U/ ²³⁴ U fezes	²³⁸ U (mBq/L) urina
146	Prensa	10	1,4	114,7 ± 11,7	572,2 ± 49,4	0,2	0,2
215	Retífica	31	3,1	20,4 ± 4,8	54,7 ± 8,6	0,4	0,5
135	Retífica	10	2,5	11,9 ± 4,0	24,1 ± 5,7	0,5	0,1
164	Forno sinterização	18	4,0	16,9 ± 5,8	30,4 ± 7,7	0,6	0,3
141	Peneiramento	78 ^c	1,8	74,0±11,1	199,8±30,0	0,4	0,5
232	Prensa	36	1,6	9,9 ± 2,4	22,3 ± 3,7	0,4	0,2
219	Retífica	34	2,4	24,2 ± 4,4	46,6 ± 6,3	0,5	0,1
216	Retífica	52	2,0	10,2 ± 2,9	19,3 ± 4,0	0,5	0,2
220	Retífica	52	1,9	5,6 ± 2,7	16,3 ± 5,0	0,3	-
271	Forno sinterização	72	1,5	5,0±1,3	14,6±2,3	0,3	<LMD
260	Prensa	133	0,5	3,4 ± 1,4	5,5±1,7	0,6	<LMD
275	Retífica	141	2,4	34,7 ± 5,8	69,7 ± 9,2	0,5	0,1
267	Retífica	131	4,2	8,5±3,5	14,5±4,4	0,6	<LMD
276	Peneiramento	201 ^c	1,2	19,3±2,8	54,1±5,7	0,4	0,1
273	Retífica	255	0,7	2,5±1,0	5,0±1,3	0,5	0,1

^a data da coleta das amostras de excreta

^b massas das amostras de fezes calcinadas

^c Dias após o início da operação

Na Tabela 4.23, observa-se que as concentrações de ^{238}U nas amostras de fezes dos 15 trabalhadores do Grupo 2 estão entre 2,0 e 82,5 mBq/g, equivalentes a 8,5 e 114,7 mBq/dia, respectivamente. As concentrações de ^{234}U nas amostras de fezes dos 15 trabalhadores estão entre 3,5 e 411,7 mBq/g, equivalentes a 14,0 e 572 mBq/dia, respectivamente. Tais atividades refletem a exposição ocupacional e a excreção do urânio natural.

AVALIAÇÃO DAS RAZÕES URINA:FEZES DOS TRABALHADORES DO GRUPO 2

Para realizar esta avaliação, tornou-se necessário analisar, para cada trabalhador, a concentração de urânio nas fezes e a concentração de urânio na urina, descontando a contribuição da exposição ambiental, conforme descrito anteriormente no capítulo 3. O ^{238}U é o isótopo preferencial de análise pois a concentração de ^{238}U na urina é medida diretamente. O ^{234}U só vai ser usado quando não for possível utilizar os valores referentes ao ^{238}U . A concentração de ^{234}U na urina é obtida a partir da concentração de ^{238}U , aplicando um fator de equilíbrio equivalente ao das fezes.

Análise de ^{238}U nas amostras de fezes

Na Tabela 4.24 estão apresentados os valores de concentrações de ^{238}U nas amostras de fezes dos trabalhadores do Grupo 2 (exposto), após o desconto da contribuição ambiental, conforme item 3.2.3 do Capítulo 3 (Metodologia). Das 15 amostras analisadas, 10 apresentaram concentrações de urânio nas fezes em mBq/g menores ou próximos aos valores referentes à exposição ambiental (5,93 mBq/g). Como essas amostras foram coletadas durante os dias de folga, após o período de produção, é possível que mesmo com o indicativo de que houve exposição, o trabalhador apresente concentração de urânio nas fezes na ordem da excreção ambiental.

Após o desconto da contribuição ambiental, apenas cinco amostras apresentaram valores positivos de concentração de ^{238}U nas fezes, caracterizando a exposição ocupacional. Essas amostras estão codificadas como 146, 141, 219, 275 e 276.

Tabela 4.24: Atividades de ^{238}U nas amostras de fezes dos trabalhadores do Grupo 2.

Código do trabalhador	Função	Dias após término da operação ^a	Massa ^b (g cinza)	^{238}U (mBq/dia)	$^{238}\text{U}^c$ (mBq/dia) líquido
146	Prensa	10	1,4	114,7	106,5
215	Retífica	31	3,1	20,4	1,8
135	Retífica	10	2,5	11,9	Bg
164	Forno sinterização	18	4,0	16,9	Bg
141	Peneiramento	78 ^d	1,8	74,0	63,4
232	Prensa	36	1,6	9,9	0,6
219	Retífica	34	2,4	24,2	9,8
216	Retífica	52	2,0	10,2	Bg
220	Retífica	52	1,9	5,6	Bg
271	Forno sinterização	72	1,5	5,0	Bg
260	Prensa	133	0,5	3,4	0,24
275	Retífica	141	2,4	34,7	20,5
267	Retífica	131	4,2	8,5	Bg
276	Peneiramento	201 ^d	1,2	19,3	12,0
273	Retífica	255	0,7	2,5	Bg

^a data da coleta das amostras de excreta

^b massas das amostras de fezes calcinadas

^c Concentrações de urânio nas amostras de fezes dos trabalhadores do Grupo 2 após o desconto da contribuição ambiental.

^d dias após o início da operação

Análise de ^{238}U nas amostras de urina

Das 15 amostras analisadas, sete apresentaram resultados (em mBq/L) menores ou próximos aos valores referentes à exposição ambiental, que é 0,0916 mBq/L (média geométrica das concentrações de urânio em amostras de urina de indivíduos não ocupacionalmente expostos da cidade do Rio de Janeiro).

Na Tabela 4.25 estão apresentados os valores de concentrações de urânio nas amostras de urina dos trabalhadores do Grupo 2, após o desconto da contribuição ambiental, conforme descrito no item 3.2.3.2 do Capítulo 3 (Metodologia)

Tabela 4.25 - Atividades de ^{238}U nas amostras de urina dos trabalhadores do Grupo 2.

Código do trabalhador	Função	Dias após término da operação ^a	Amostras de urina		
			^{238}U (mBq/L)	^{238}U (mBq/dia)	^{238}U (mBq/dia) Líquido ^b
146	Prensa	10	0,2	0,3	0,18
215	Retífica	31	0,5	0,7	0,56
135	Retífica	10	0,1	0,1	0,01
164	Forno sinterização	18	0,3	0,4	0,29
141	Peneiramento	78 ^c	0,5	0,6	0,52
232	Prensa	36	0,2	0,3	0,14
219	Retífica	34	0,1	0,2	0,08
216	Retífica	52	0,2	0,3	0,21
220	Retífica	52	-	--	
271	Forno sinterização	72	<LMD	--	Bg
260	Prensa	133	<LMD	--	Bg
275	Retífica	141	0,1	0,1	0,01
267	Retífica	131	<LMD	--	Bg
276	Peneiramento	201 ^c	0,1	0,2	0,04
273	Retífica	255	0,1	0,1	Bg

^a data da coleta das amostras de excreta

^b Concentrações de urânio nas amostras de urina dos trabalhadores após o desconto da contribuição ambiental.

^c dias após o início da operação

LMD= $6,0 \times 10^{-2}$ mBq/L

Após o desconto da contribuição ambiental, apenas 10 amostras apresentaram valores positivos de concentrações de ^{238}U na urina, caracterizando a exposição ocupacional. As amostras que apresentaram valores positivos de concentrações de urânio são as codificadas como 146, 215, 164, 141, 232, 219 e 216.

Alguns autores não consideram a contribuição da exposição ambiental na interpretação dos dados de excreção urinária, pois em todos os estudos de exposição ambiental uma parcela significativa dos resultados encontra-se abaixo do limite de detecção. Neste trabalho, optou-se em descontar a contribuição da exposição ambiental, para uniformizar o procedimento adotado para análise dos resultados de fezes e urina.

As concentrações de urânio nas amostras de urina dos trabalhadores da Unidade 2 da FCN, os quais manipulam urânio na forma de UO_2 , estão na mesma ordem de grandeza que as concentrações de urânio na urina dos trabalhadores da Unidade 1, que

manipulam apenas as pastilhas de UO₂, o que indica exposição semelhante, e ao mesmo tipo de composto.

Os dados apresentados nas Tabelas 4.18 e 4.19 indicam que os trabalhadores 215, 164, 232 e 216 apresentam concentrações de urânio nas fezes equivalentes à exposição ambiental, e concentrações de urânio na urina superiores ao valor médio encontrado para indivíduos com exposição ambiental.

Análise das razões urina:fezes

A partir das concentrações de ²³⁸U nas amostras de fezes e urina, calculou-se as razões urina:fezes para os trabalhadores do Grupo 2. Essas razões foram calculadas sem o desconto da contribuição ambiental, descontando-se a contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes e descontando a contribuição ambiental somente nas amostras de fezes, como apresenta a Tabela 4.26.

Tabela 4.26: Razão urina:fezes dos trabalhadores (prensa, retífica, sinterização e peneiramento) do Grupo 2.

Código do trabalhador	Função	Dias após término da operação ^a	Urina:fezes	Urina:fezes (líquido ^b)
146	Prensa	10	2,7 x 10 ⁻⁰³	1,7 x 10 ⁻⁰³
232	Prensa	36	2,7 x 10 ⁻⁰²	2,4 x 10 ⁻⁰¹
219	Retífica	34	8,7 x 10 ⁻⁰³	8,4 x 10 ⁻⁰³
273	Retífica	255	5,1 x 10 ⁻⁰²	--
135	Retífica	10	1,2 x 10 ⁻⁰²	-
275	Retífica	141	4,0 x 10 ⁻⁰³	5,7 x 10 ⁻⁰⁴
215	Retífica	31	3,3 x 10 ⁻⁰²	3,0 x 10 ⁻⁰¹
216	Retífica	52	3,3 x 10 ⁻⁰²	-
164	Forno sinterização	18	2,5 x 10 ⁻⁰²	-
141	Peneiramento	78 ^c	8,7 x 10 ⁻⁰³	8,1 x 10 ⁻⁰³
276	Peneiramento	201 ^c	8,7 x 10 ⁻⁰³	3,3 x 10 ⁻⁰³

^a data da coleta das amostras de excreta

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes;

^c dias após o início da operação

SIMULAÇÃO DO TIPO DE INCORPORAÇÃO

O processo de preparação de pastilhas de UO_2 é realizado na Unidade 2 da FCN. Os setores onde ocorrem as etapas de prensa, retífica e sinterização funcionaram no período de 19/01/2002 a 28/03/2002 (68 dias). O peneiramento funcionou no período de 09/01/2002 a 22/12/2002 (337 dias).

O óxido de urânio utilizado nessa etapa do processo está na forma de UO_2 , classificado como composto insolúvel (tipo S) de acordo com a publicação 66 da ICRP (1993) e o *Supporting Guidance 3* da ICRP (2003).

O *Supporting Guidance 3* da ICRP (2003) apresenta parâmetros de retenção pulmonar específicos para o UO_2 , derivados de experimentos *in vivo* (Stradling e cols, 2002; Ansoborlo e cols, 2002), como descrito no Capítulo 2.

Tais parâmetros indicam que o UO_2 é mais solúvel que o composto tipo S, segundo a classificação padrão da ICRP (1994).

Neste trabalho, as razões experimentais foram comparadas com as razões derivadas a partir dos parâmetros de retenção das publicações da ICRP (1993; 2003) e dos estudos *in vivo* disponíveis na literatura (Stradling e cols, 2002; Ansoborlo e cols, 2002). As simulações dos cenários de incorporação são mostradas a seguir, separadamente, conforme a função exercida pelo trabalhador na Unidade 2 da FCN.

As razões urina:fezes derivadas a partir dos parâmetros sugeridos pela ICRP (1994), e pelos dados da literatura, serão chamadas de razões urina:fezes teóricas.

Para cada indivíduo, os valores experimentais das razões urina/fezes foram comparados com os valores esperados para compostos padrão da ICRP, e para os parâmetros específicos para UO_2 teóricos, conforme especificado no Capítulo 2.

Utilizou-se o código computacional *Activity and Internal Dose Estimates* – Versão 2 (AIDE-2) – para simular a incorporação de compostos de urânio com diferentes parâmetros de absorção do sistema respiratório para o sistema sanguíneo, que serão agora denominados compostos de diferentes “solubilidades”.

Foram testados os parâmetros de referência da publicação 66 da ICRP (1993), para os compostos tipo F, M e S, assim como para parâmetros de absorção f_r , s_r e s_s , sugeridos na literatura para UO_2 , como apresentado na Tabela 4.27. O código computacional AIDE-2 fornece a taxa de excreção urinária e fecal (Bq/Bq incorporado), após a incorporação aguda de 1 Bq de urânio, ou após a incorporação crônica de 1 Bq por dia de urânio, em diferentes tempos durante e após a exposição.

Tabela 4.27: Parâmetros utilizados na simulação da incorporação de compostos de diferentes solubilidades (parâmetros descritos no Capítulo 2).

Simulações	f_r	s_r	s_s
Tipo F	1	100	-
Tipo M	0,1	100	0,005
Tipo S	0,001	100	0,0001
ICRP 2003 ^a	0,03	1,25	0,0015
UO ₂ (UK) ^b	0,01	0,95	0,00061
UO ₂ (F) ^c	0,02	1,3	0,00086
UO ₂ (UK ₂) ^b	0,01	1,3	0,00026

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003);

^b Stradling e cols., 2002;

^c Ansbolo e cols., 2002;

ESTUDO DE CASOS

Para todos os trabalhadores da produção de pastilhas, foram considerados os seguintes cenários de incorporação:

- Crônica por inalação e ingestão durante o período de produção de pastilha, seguido de um período sem exposição radiológica ocupacional;
- Crônica por inalação e ingestão, mesmo após o término da produção de pastilha;
- Incorporação de curta duração (aguda), em data próxima da coleta das amostras de excreta.

A exposição de cada trabalhador foi analisada individualmente para cada cenário de incorporação e para diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório para o sangue. Para o trabalhador 146, descrevemos detalhadamente todos os passos seguidos. Para os demais trabalhadores, seguimos a mesma metodologia aplicada ao trabalhador 146 mas nesse capítulo serão apresentados somente os resultados e discussão. A apresentação detalhada de cada caso encontra-se no Apêndice B.

Caso 1: Avaliação do trabalhador 146 em 2002

- Período de exposição na fabricação de pastilhas de UO₂: 68 dias.
- Data de coleta: 07/04/02 - Equivale a 78 dias após o início do período de exposição, ou 10 dias após o término de 68 dias de exposição contínua.

As atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes, e a razão urina:fezes experimental, estão apresentadas na Tabela 4.28. Supõe-se que a amostra foi coletada 78 dias após o início da produção.

Tabela 4.28: Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina: fezes experimental do trabalhador 146, amostras coletadas em 07/04/02.

Código do trabalhador	Função	Dias após término da operação ^a	^{238}U		
			Fezes (mBq/dia)	Urina (mBq/dia)	Urina:Fezes líquida ^b
146	Prensa	10	106,5	0,18	$1,7 \times 10^{-03}$

^a data da coleta das amostras de excreta

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes.

Para o trabalhador 146 foram testadas três hipóteses, descritas a seguir.

Primeira hipótese: Exposição crônica via inalação, seguida de um período sem exposição, com a fábrica parada:

Esta hipótese considera que o trabalhador esteve exposto durante 68 dias a um composto de UO_2 , sendo a inalação a principal via de incorporação, e os diâmetros aerodinâmicos medianos das partículas inaladas iguais a $1 \mu\text{m}$ (DAMA). A simulação foi feita considerando-se uma incorporação contínua durante 68 dias de trabalho. Considera-se que as amostras de fezes e urina foram coletadas 78 dias após o início do período de funcionamento da Unidade 2. As razões urina:fezes teóricas para os diferentes tipos de “solubilidade” estão apresentados na Tabela 4.29.

Tabela 4.29: Frações teóricas de urânio nas amostras de fezes e urina a partir da simulação da incorporação durante 68 dias por inalação de compostos tipo F, M, S e UO_2 , com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão. Considera-se que as amostras foram coletadas 78 dias após o início da exposição.

Tipo de simulação	Urina	Fezes	Razão
Tipo F	$3,6 \times 10^{-02}$	$1,9 \times 10^{-04}$	$1,9 \times 10^{+02}$
Tipo M	$2,5 \times 10^{-02}$	$2,6 \times 10^{-02}$	$9,8 \times 10^{+00}$
Tipo S	$7,2 \times 10^{-04}$	$3,4 \times 10^{-02}$	$2,1 \times 10^{-02}$
ICRP 2003 ^a	$9,4 \times 10^{-03}$	$3,1 \times 10^{-02}$	$3,0 \times 10^{-01}$
UO_2 (UK) ^b	$3,6 \times 10^{-03}$	$3,3 \times 10^{-02}$	$1,1 \times 10^{-01}$
UO_2 (F) ^c	$5,0 \times 10^{-03}$	$3,3 \times 10^{-02}$	$1,5 \times 10^{-01}$
UO_2 (UK ₂) ^b	$1,7 \times 10^{-03}$	$3,4 \times 10^{-02}$	$5,1 \times 10^{-02}$
Ingestão composto insolúvel	$3,0 \times 10^{-04}$	$2,2 \times 10^{-04}$	$1,3 \times 10^{+00}$

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003);

^b Stradling e cols, 2002;

^c Ansorbolo e cols, 2002;

Os dados apresentados nas Tabela 4.28 e 4.29 mostram que, para todas as simulações, o valor da razão experimental não está compatível com os valores das razões teóricas.

Segunda hipótese: Exposição crônica ininterrupta, apesar das atividades de produção de pastilha estarem concluídas:

Neste caso, o trabalhador poderia estar realizando outras atividades rotineiras dentro da fábrica, e continuar exposto ao urânio. Comparando-se a razão experimental com as teóricas, observa-se, na Tabela 4.30, que a razão experimental aproxima-se da razão teórica, supondo-se inalação de um composto tipo S, ou ingestão.

Tabela 4.30: Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua por inalação durante 78 dias de compostos tipo F, M, S e UO₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão.

Tipo de simulação	Urina	Fezes	Razão
Tipo F	$9,5 \times 10^{-02}$	$9,5 \times 10^{-02}$	$1,0 \times 10^{-00}$
Tipo M	$3,6 \times 10^{-02}$	$2,2 \times 10^{-01}$	$1,6 \times 10^{-01}$
Tipo S	$1,0 \times 10^{-03}$	$2,5 \times 10^{-01}$	$4,2 \times 10^{-03}$
ICRP 2003 ^a	$1,5 \times 10^{-02}$	$2,4 \times 10^{-01}$	$6,1 \times 10^{-02}$
UO ₂ (UK) ^b	$5,0 \times 10^{-03}$	$2,5 \times 10^{-01}$	$2,0 \times 10^{-02}$
UO ₂ (F) ^c	$7,3 \times 10^{-03}$	$2,5 \times 10^{-01}$	$3,0 \times 10^{-02}$
UO ₂ (UK) ₂ ^b	$2,8 \times 10^{-03}$	$2,5 \times 10^{-01}$	$1,1 \times 10^{-02}$
Ingestão composto insolúvel	$1,0 \times 10^{-03}$	$9,0 \times 10^{-01}$	$1,1 \times 10^{-03}$

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003);

^b Stradling e cols, 2002;

^c Ansorbolo e cols, 2002;

Terceira hipótese: Exposição de curta duração, via inalação, com incorporação substancialmente superior à incorporação crônica diária que o trabalhador poderia ter durante os 68 dias.

Esta hipótese considera que o trabalhador sofreu uma incorporação por inalação de duração limitada de compostos com DAMA de 1 µm, durante ou após a interrupção da produção de pastilhas. As razões teóricas entre as concentrações de urânio nas amostras de urina e nas amostras de fezes apontam para exposição após o período de funcionamento da fábrica. A figura 4.12 mostra a variação das razões teóricas urina:fezes, para as diferentes solubilidades de urânio conforme o tempo pós exposição.

Varição da razão teórica urina:fezes para diferentes solubilidades de urânio conforme o tempo pós exposição

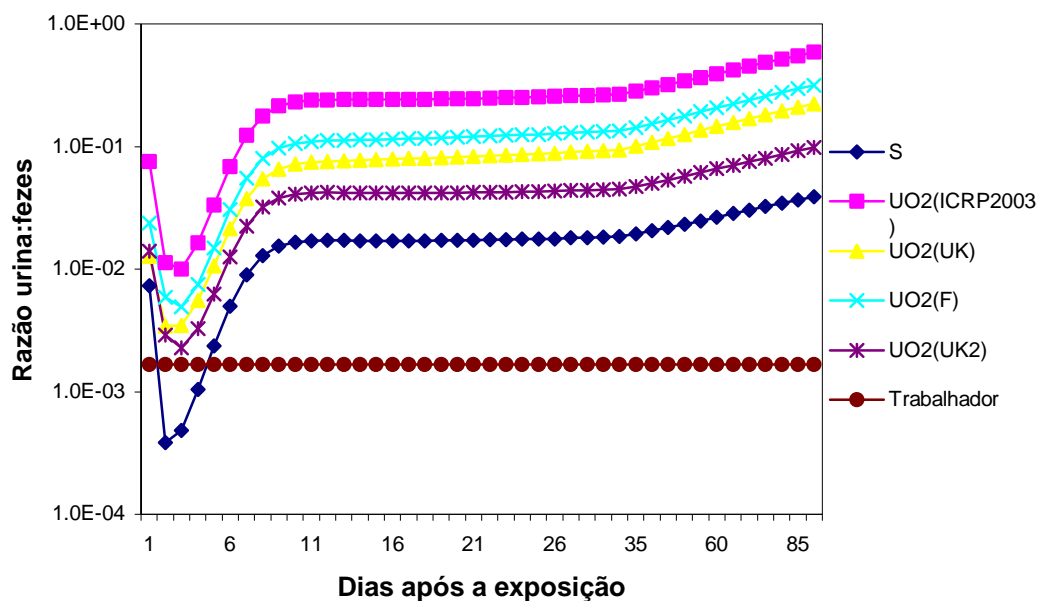


Figura 4.12: Variação das razões teóricas urina:fezes para as diferentes solubilidades de urânio conforme o tempo pós exposição

Conforme pode ser visualizado, os modelos teóricos mostram exposição provável num período até 10 dias após o término do suposto período de exposição. Como a coleta de amostras de excreta foi realizada 10 dias após a interrupção da produção de pastilhas podemos especular que o trabalhador tenha voltado à fábrica após a interrupção da produção de pastilhas e tenha se exposto em outro serviço.

As razões urina:fezes teóricas estão apresentadas na Tabela 4.31, para amostras coletadas de um a cinco dias após a exposição.

Comparando-se o modelo teórico com os dados experimentais, verificamos que a razão urina:fezes experimental está na mesma ordem de grandeza da razão teórica esperada para inalação de um composto do tipo S, e exposição via ingestão.

Tabela 4.31: Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação por inalação de compostos tipo F, M, S e UO₂ com diferentes parâmetros de absorção, e incorporação via ingestão, considerando-se incorporação de curta duração e coleta de fezes e urina até cinco dias após a exposição.

Tipo de Simulação	Urina/fezes (1º dia)	Urina/fezes (2º dia)	Urina/fezes (3º dia)	Urina/fezes (4º dia)	Urina/fezes (5º dia)
Tipo M	$3,3 \times 10^{-01}$	$1,3 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^{-2}$	4,5 E-02	$1,0 \times 10^{-2}$
Tipo S	$7,2 \times 10^{-03}$	$3,9 \times 10^{-4}$	$4,9 \times 10^{-4}$	1,1 E-03	$2,3 \times 10^{-3}$
ICRP, 2003 ^a	$7,5 \times 10^{-02}$	$1,1 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	1,6 E-02	$3,3 \times 10^{-2}$
UO ₂ (UK) ^b	$1,3 \times 10^{-02}$	$3,4 \times 10^{-3}$	$3,5 \times 10^{-3}$	5,6 E-03	$1,1 \times 10^{-2}$
UO ₂ (F) ^c	$2,3 \times 10^{-02}$	$5,9 \times 10^{-3}$	$4,9 \times 10^{-3}$	7,4 E-03	$1,5 \times 10^{-2}$
UO ₂ (UK ₂) ^b	$1,4 \times 10^{-02}$	$2,9 \times 10^{-3}$	$2,3 \times 10^{-3}$	3,3 E-03	$6,3 \times 10^{-3}$
Ingestão composto insolúvel recente	$4,5 \times 10^{-03}$	$1,8 \times 10^{-4}$	$1,9 \times 10^{-4}$	4,1 E-04	$9,6 \times 10^{-4}$

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003);

^b Stradling e cols, 2002;

^c Ansbolo e cols, 2002

A Tabela 4.31 mostra que a razão experimental também está muito próxima das razões teóricas derivadas para os modelos denominados UO₂(UK), UO₂(F) e UO₂(UK₂), para coletas dois a três dias após a incorporação. Observa-se também que quatro dias a cinco dias após uma incorporação de curta duração, a razão teórica aproxima-se da experimental, para o tipo S.

A Tabela 4.32 apresenta as razões urina:fezes teóricas após uma única incorporação, considerando que a amostra foi coletada no período de um a 20 dias após a incorporação. Observa-se que o valor da razão experimental afasta-se dos valores teóricos para os compostos tipo S, UO₂(ICRP), UO₂(F) e UO₂(UK₂), 5 dias após a incorporação, conforme mostrado na Figura 4.12 indicando que não deve ter ocorrido uma incorporação de curta duração durante o período de fabricação das pastilhas.

Tabela 4.32: Razões urina:fezes teóricas a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO₂ com diferentes parâmetros de absorção, e incorporação via ingestão, considerando-se incorporação de curta duração e coleta de fezes e urina até 20 dias após a exposição.

Dias após uma incorporação	Razão urina:fezes após única incorporação				
	S	UO ₂ (ICRP) ^a	UO ₂ (UK) ^b	UO ₂ (F) ^c	UO ₂ (UK ₂) ^b
1	7,2 x 10 ⁻⁰³	7,5 x 10 ⁻⁰²	3,0 x 10 ⁻⁰²	2,3 x 10 ⁻⁰²	1,4 x 10 ⁻⁰²
5	2,4 x 10 ⁻⁰³	3,4 x 10 ⁻⁰²	1,1 x 10 ⁻⁰²	1,5 x 10 ⁻⁰²	6,4 x 10 ⁻⁰³
6	5,0 x 10 ⁻⁰³	6,9 x 10 ⁻⁰²	2,4 x 10 ⁻⁰²	3,1 x 10 ⁻⁰²	1,3 x 10 ⁻⁰²
7	9,0 x 10 ⁻⁰³	1,2 x 10 ⁻⁰¹	4,3 x 10 ⁻⁰²	5,5 x 10 ⁻⁰²	2,2 x 10 ⁻⁰²
8	1,3 x 10 ⁻⁰²	1,8 x 10 ⁻⁰¹	6,2 x 10 ⁻⁰²	8,1 x 10 ⁻⁰²	3,2 x 10 ⁻⁰²
9	1,5 x 10 ⁻⁰²	2,2 x 10 ⁻⁰¹	7,5 x 10 ⁻⁰²	9,7 x 10 ⁻⁰²	3,8 x 10 ⁻⁰²
10	1,7 x 10 ⁻⁰²	2,3 x 10 ⁻⁰¹	8,1 x 10 ⁻⁰²	1,1 x 10 ⁻⁰¹	4,1 x 10 ⁻⁰²
11	1,7 x 10 ⁻⁰²	2,4 x 10 ⁻⁰¹	8,4 x 10 ⁻⁰²	1,1 x 10 ⁻⁰¹	4,2 x 10 ⁻⁰²
15	1,7 x 10 ⁻⁰²	2,4 x 10 ⁻⁰¹	8,6 x 10 ⁻⁰²	1,1 x 10 ⁻⁰¹	4,2 x 10 ⁻⁰²
20	1,7 x 10 ⁻⁰²	2,5 x 10 ⁻⁰¹	8,8 x 10 ⁻⁰²	1,2 x 10 ⁻⁰¹	4,2 x 10 ⁻⁰²

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003);

^b Stradling e cols, 2002;

^c Ansbolo e cols, 2002

Pelo fato da amostra de fezes apresentar uma alta concentração de urânio, os dados indicam que a incorporação pode ter ocorrido por ingestão, inalação ou ambos. A contaminação mais provável de um trabalhador é por inalação. Teoricamente, especulou-se a possibilidade da amostra ter sido coletada após um serviço extra, com incorporação de UO₂, apesar da fábrica não estar produzindo pastilhas. O composto de urânio (UO₂) poderia, nesta hipótese ser do Tipo S ou apresentar parâmetros de absorção do pulmão para o sangue que se diferenciam do padrão (ICRP (2003); Ansbolo e cols, 2002; Stradling e cols, 2002).

Caso 2: Avaliação do trabalhador 146 em 2003

Em dezembro de 2002, a fábrica iniciou uma nova operação com duração de quatro meses, aproximadamente. No ano de 2003 foram coletadas amostras de fezes e

urina deste mesmo trabalhador. Determinou-se a concentração de urânio nas amostras. Tais análises fazem parte do trabalho realizado por Xavier (2005), no qual foram analisadas as concentrações de urânio em amostras de fezes e de urina de diversos trabalhadores da FCN, inclusive o trabalhador, ora em estudo.

As amostras foram coletadas em 15 de fevereiro de 2003, 67 dias após o início da operação. Na Tabela 4.33 estão apresentadas as atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes, e a razão urina:fezes experimental.

Tabela 4.33: Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 146, amostras coletadas em 15/02/03.

Código do trabalhador	Função	Dias após o início da operação ^a	^{238}U		
			Fezes (mBq/dia)	Urina (mBq/dia)	Urina:Fezes líquida ^b
146	prensa	67	197,5	0,07	-

^a data da coleta das amostras de excreta

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes.

A excreção urinária diária, considerando-se o volume excretado de 1,4 L, foi de 0,07 mBq/dia. Este valor está próximo ao valor referente à excreção devido à exposição ambiental. Assim, não é possível calcular a razão urina:fezes experimental, em relação ao ^{238}U . Considerando que a mesma razão isotópica $^{238}\text{U}:^{234}\text{U}$ encontrada nas amostras de fezes repete-se nas amostras de urina, a razão entre as concentrações de ^{234}U em amostras de urina:fezes pode ser calculada como $2,41 \times 10^{-4}$, após o desconto da contribuição ambiental.

Foram testadas duas hipóteses, descritas a seguir.

Primeira hipótese: Exposição crônica via inalação durante o período de produção:

Esta hipótese considera que o trabalhador esteve exposto durante 67 dias a um composto de UO_2 , sendo a inalação a principal via de incorporação, e os diâmetros aerodinâmicos medianos das partículas inaladas iguais a 1 μm (DAMA).

As razões urina:fezes teóricas esperadas para diferentes tipos de parâmetros de absorção do modelo pulmonar descrito na publicação 66 da ICRP (1994), e conforme especificado no Capítulo 2, estão apresentadas na Tabela 4.34. Observa-se que as razões teóricas são diferentes da razão experimental calculada em relação ao ^{234}U , indicando que provavelmente não ocorreu exposição crônica via inalação ou ingestão.

Tabela 4.34: Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 67 dias de compostos tipo F, M, S e UO₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório, e incorporação via ingestão.

Tipo de simulação	Urina	Fezes	Razão
Tipo F	$2,2 \times 10^{-01}$	$1,0 \times 10^{-01}$	$2,1 \times 10^{+00}$
Tipo M	$4,1 \times 10^{-02}$	$2,3 \times 10^{-01}$	$1,7 \times 10^{-01}$
Tipo S	$1,0 \times 10^{-03}$	$2,6 \times 10^{-01}$	$4,1 \times 10^{-03}$
ICRP, 2003 ^a	$1,2 \times 10^{-01}$	$2,2 \times 10^{-01}$	$5,3 \times 10^{-01}$
UO ₂ (UK) ^b	$3,8 \times 10^{-03}$	$2,6 \times 10^{-01}$	$1,5 \times 10^{-02}$
UO ₂ (F) ^c	$5,8 \times 10^{-03}$	$2,5 \times 10^{-01}$	$2,3 \times 10^{-02}$
UO ₂ (UK ₂) ^b	$2,6 \times 10^{-03}$	$2,6 \times 10^{-01}$	$1,0 \times 10^{-02}$
Ingestão composto insolúvel	$1,8 \times 10^{-03}$	$1,00 \times 10^{-00}$	$1,8 \times 10^{-03}$

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003);

^b Stradling e cols, 2002;

^c Ansoy e cols, 2002

Segunda hipótese: Exposição de curta duração, via inalação, com incorporação substancialmente superior à incorporação crônica diária que o trabalhador poderia ter durante os 67 dias:

Pelo fato da amostra de fezes apresentar uma alta concentração de urânio, os dados indicam que a incorporação pode ter ocorrido por ingestão ou inalação de um composto, e que a amostra pode ter sido coletada logo após um período em que o trabalhador executou alguma tarefa que resultou na incorporação de UO₂. Ao comparar as razões teóricas apresentadas na Tabela 4.31 com a razão experimental, observa-se que ela está na mesma ordem de grandeza da razão teórica, ao simular incorporação de um composto tipo S e /ou ingestão do composto, quando as amostras de fezes e urina são coletadas dois ou três dias após a incorporação de UO₂.

Conclusão:

Pelo fato da amostra de fezes apresentar alta concentração de urânio, há indicativo de que tenha ocorrido incorporação por ingestão, e que não tenha ocorrido incorporação crônica por inalação. Há indicativos de que tenha havido uma incorporação de curta duração por inalação de um composto tipo S, e que as amostras de urina e fezes tenham sido coletadas dois ou três dias após a incorporação.

Caso 3: Avaliação do trabalhador 232 em 2002

- Período de exposição: 68 dias;
- Data de coleta: 03/05/02 - Equivale a 104 dias após o início da exposição crônica de 68 dias, ou coleta da amostra 36 dias após o término da exposição

Para este trabalhador, as atividades de ^{238}U e ^{234}U nas amostras de urina e fezes, e razão urina:fezes experimental, estão apresentadas nas Tabelas 4.35 e 4.36. A metodologia de avaliação da via de incorporação foi a mesma utilizada na análise do caso 1. A descrição detalhada desta avaliação encontra-se no Anexo B.1.

Tabela 4.35 - Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 232, amostras coletadas em 03/05/02.

Código do trabalhador	Função	Dias após o início da operação ^a	^{238}U		
			Fezes (mBq/dia)	Urina (mBq/dia)	Urina:Fezes líquida ^b
232	prensa	104	0,6	0,14	$2,4 \times 10^{-01}$

^adata da coleta das amostras de excreta

^bdesconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes

Tabela 4.36 – Atividades de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 232, amostras coletadas em 03/05/02

Código do trabalhador	Função	Dias após o início* da operação	^{234}U		
			Fezes mBq/dia	Urina mBq/dia	Urina:Fezes líquida ^a
232	<i>prensa</i>	104	11	0,31	$2,8 \times 10^{-02}$

*data da coleta das amostras de excreta

^a desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes

Na primeira hipótese – exposição crônica via inalação durante o período de produção, a razão urina:fezes aumentada em relação ao ^{238}U ocorre porque a concentração de ^{238}U nas fezes é equivalente à exposição ambiental. Em relação ao ^{234}U , observa-se que a razão experimental está na mesma ordem de grandeza da razão teórica, ao simular a incorporação de um composto tipo S.

Na segunda hipótese, considerando que o trabalhador poderia estar realizando outras atividades rotineiras dentro da fábrica, com exposição ocupacional ao urânio, observa-se que a mesma se aproxima da razão teórica ao simular a incorporação de um composto $\text{UO}_2(\text{UK})$ ou $\text{UO}_2(\text{F})$, considerando a razão experimental do ^{234}U . Esta hipótese na prática é difícil que tenha ocorrido.

Quando comparamos a razão experimental para o ^{234}U com as razões teóricas podemos especular que o trabalhador poderia ter sido exposto a um composto Tipo UO_2 (F), no período após a interrupção da fábrica de pastilhas.

Observa-se ainda que a concentração diária de ^{238}U na urina é 0,138 mBq, na mesma ordem de grandeza que a concentração encontrada na urina dos trabalhadores da Unidade 1, que incorporaram composto classificado como tipo S.

A baixa concentração de urânio nas fezes dificulta afirmar o tipo de incorporação que ocorreu. Especulou-se a possibilidade da amostra ter sido coletada após um serviço eventual, com incorporação de UO_2 , apesar da fábrica não estar produzindo pastilhas. O composto de urânio nessa hipótese apresentou parâmetros de absorção do pulmão para o sangue que se diferenciam do padrão, conforme descrito e considerado mais realístico na literatura (Ansolobol e cols, 2002)

Caso 4: Avaliação do trabalhador 232 em 2003

- Período de exposição: 127 dias;
- Data de coleta: 17/04/03 - Equivale a 127 dias após o início da exposição crônica.

Em 2003, foram coletadas amostras de fezes e urina do mesmo trabalhador 232 (caso 3).

Para este trabalhador a atividade de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental estão apresentadas na Tabela 4.37. A metodologia de avaliação da via de incorporação foi a mesma utilizada na análise do caso 3. A descrição detalhada desta avaliação encontra-se no ANEXO B.2

Tabela 4.37: Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador B, amostras coletadas em 17/04/03.

Código do trabalhador	Função	Dias após o início da operação ^a	^{238}U		
			Fezes (mBq/dia)	Urina (mBq/dia)	Urina:Fezes líquida ^b
232	prensa	127	367,4	0,35	$1,0 \times 10^{-3}$

^adata da coleta das amostras de excreta

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes.

Ao considerar a exposição crônica, observou-se que a razão teórica é praticamente a mesma que a encontrada para a hipótese de ingestão crônica, indicando que esta poderia ter sido a principal via de incorporação.

Avaliando a exposição eventual, verificamos que a razão urina:fezes experimental está na mesma ordem de grandeza da razão teórica esperada para inalação de um composto tipo S, e exposição via ingestão quatro ou cinco dias após a incorporação. Observa-se ainda que a razão experimental é compatível com a razão teórica no terceiro dia após uma única incorporação, indicando que pode ter ocorrido inalação de um composto Tipo $UO_2(UK_2)$.

Pelo fato da amostra de fezes apresentar uma alta concentração de urânio, os dados indicam que a incorporação pode ter ocorrido por ingestão ou inalação de um composto tipo S, ou $UO_2(UK_2)$, e que a amostra deve ter sido coletada logo após um período em que o trabalhador executou alguma tarefa que resultou na incorporação de UO_2 .

Caso 5: Avaliação do trabalhador 219 em 2002

- Período de exposição: 68 dias;
- Data da coleta: 01/05/2002 - Equivale a 102 dias após o início da exposição crônica de 68 dias, ou coleta da amostra 34 dias após o término da exposição.

A coleta da amostra foi realizada em 01/05/2002, e equivale a 102 dias após o início da exposição crônica de 68 dias, ou coleta da amostra 34 dias após o término da exposição. Para este trabalhador, a atividade de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental estão apresentadas na Tabela 4.38. A metodologia de avaliação da via de incorporação foi a mesma utilizada na análise dos casos anteriores. A descrição detalhada desta avaliação encontra-se no Anexo B.3.

Tabela 4.38: Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 219, amostras coletadas em 01/05/02.

Código do trabalhador	Função	Dias após o início da operação ^a	^{238}U		
			Fezes (mBq/dia)	Urina (mBq/dia)	Urina:Fezes líquida ^b
219	retífica	102	9,8	0,08	8.4×10^{-03}

^adata da coleta das amostras de excreta

^bdesconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes.

Ao considerar a exposição crônica, mesmo após o término da produção, observou-se que a razão teórica é semelhante à encontrada para a hipótese de inalação de um composto Tipo S, indicando que esta poderia ter sido a principal via de

incorporação. Comparando-se os dados experimentais com o modelo teórico, simulando incorporação única, os dados indicam que a razão urina:fezes experimental está na mesma ordem de grandeza da razão teórica de um composto do Tipo S, no dia anterior ao dia da coleta da amostra. Esta é a hipótese mais provável. A hipótese de incorporação crônica não pode ser descartada.

Caso 6: Avaliação do trabalhador 273 em 2002

- Período de exposição: 68 dias;
- Data da coleta: 08/12/2002 - Equivale a 323 dias após o início da exposição crônica de 68 dias, ou coleta da amostra 255 dias após o término da exposição.

As amostras de fezes do trabalhador 273 apresentam concentrações próximas ao que seria esperado devido à exposição ambiental para ^{238}U e ^{234}U . A concentração de ^{238}U na amostra de urina também é próxima da ambiental. Sendo assim, não é possível calcular a razão urina:fezes experimental. Os resultados e a descrição detalhada desta avaliação encontram-se no Anexo B.4.

O fato das amostras de urina e fezes apresentarem uma baixa concentração de urânio, próxima à contribuição ambiental, dificulta afirmar se realmente ocorreu incorporação crônica por inalação de um composto tipo S.

Caso 7: Avaliação do trabalhador 275 em 2002

- Período de exposição: 68 dias;
- Data de coleta: 16/08/02 - Equivale a 209 dias após o início da exposição crônica de 68 dias, ou coleta da amostra 141 dias após o término da exposição.

Para este trabalhador, a atividade de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental estão apresentadas na Tabela 4.39. A metodologia de avaliação da via de incorporação foi a mesma utilizada na análise dos outros casos. A descrição detalhada desta avaliação encontra-se no Anexo B.5.

Tabela 4.39: Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 275, amostras coletadas em 16/08/02.

Código do trabalhador	Função	Dias após o início da operação ^a	^{238}U		
			Fezes (mBq/dia)	Urina (mBq/dia)	Urina:Fezes líquida ^b
275	retífica	209	20,5	0,012	$5,8 \times 10^{-04}$

^adata da coleta das amostras de excreta

^bdesconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes.

Não há indicativo de que houve exposição crônica por inalação durante o período de exposição, e nem que o trabalhador exerceu atividades rotineiras no período em que a fábrica estava parada.

Quando a terceira hipótese é testada, verificamos que a razão urina:fezes experimental está na mesma ordem de grandeza da razão teórica, quando se assume que a coleta da excreção urinária e fecal foi realizada dois ou três dias após a incorporação por inalação, e/ou ingestão de um composto tipo S.

Caso 8: Avaliação do trabalhador 275 em 2003

- Período de exposição: 127 dias;
- Data de coleta: 16/02/03 - Equivale a 68 dias após o início da exposição crônica.

Em 2003, foram coletadas amostras de fezes e urina do mesmo trabalhador 275 (caso 7), e determinou-se a concentração de urânio nessas amostras. Para este trabalhador, a atividade de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental estão apresentadas na Tabela 4.40

A metodologia de avaliação da via de incorporação foi a mesma utilizada na análise do caso 3. A descrição detalhada desta avaliação encontra-se no Anexo B.6.

Tabela 4.40: – Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 275, amostras coletadas em 16/02/03

Código do Trabalhador	Função	Dias após o início da operação ^a	^{238}U		
			Fezes mBq/dia	Urina mBq/dia	Urina:Fezes Líquida ^b
275	retífica	68	165	0,07	$4,1 \times 10^{-4}$

^adata da coleta das amostras de excreta

^bdesconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes.

Ao considerar a hipótese de exposição crônica, verificamos que a razão urina:fezes experimental comparada com as razões teóricas simuladas para incorporação crônica via inalação não estão na mesma ordem de grandeza.

Para o cenário de exposição de curta duração, via inalação, simulou-se a incorporação única de UO_2 , considerando as diferentes solubilidades. As razões

urina:fezes teóricas indicam que a amostra pode ter sido coletada dois ou três dias após a incorporação de um composto Tipo S. Comparando-se a razão urina:fezes experimental com as razões derivadas a partir dos modelos teóricos, observa-se também que a razão urina:fezes experimental está muito próxima da razão teórica para ingestão. Esta hipótese considera que o trabalhador pode ter realizado tarefas extras e tenha manipulado UO₂ Tipo S, ocorrendo uma incorporação eventual.

Caso 9: Avaliação do trabalhador 215 em 2002

- Período de exposição: 68 dias;
- Data de coleta: 28/04/02 - Equivale a 99 dias após o início da exposição crônica de 68 dias, ou coleta da amostra 31 dias após o término da exposição.

Para este trabalhador, as atividades de ²³⁸U e ²³⁴U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental estão apresentadas nas Tabelas 4.41 e 4.42. A metodologia de avaliação da via de incorporação foi a mesma utilizada na análise dos outros casos. A descrição detalhada desta avaliação encontra-se no Anexo B.7.

Tabela 4.41: Atividades de ²³⁸U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 215, amostras coletadas em 28/04/02.

Código do trabalhador	Função	Dias após o início da operação ^a	²³⁸ U		
			Fezes (mBq/dia)	Urina (mBq/dia)	Urina:Fezes líquida ^b
215	retífica	99	1,8	0,56	3,0 x 10 ⁻⁰¹

^adata da coleta das amostras de excreta

^bdesconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes.

Tabela 4.42: Atividades de ²³⁴U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 215, amostras coletadas em 28/04/02.

Código do trabalhador	Função	Dias após o início da operação ^a	²³⁴ U		
			Fezes (mBq/dia)	Urina (mBq/dia)	Urina:Fezes líquida ^b
215	retífica	99	32	1,16	3,6 x 10 ⁻²

^adata da coleta das amostras de excreta

^bdesconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes.

Para o ²³⁸U, a razão experimental do trabalhador 215 está na ordem de 10⁻¹. Isto ocorre porque o valor de concentração de urânio na amostra de fezes está muito próximo do que seria esperado em caso de exposição ambiental.

Na hipótese de exposição crônica por inalação, em relação ao ^{234}U ao considerar que as amostras tenham sido coletadas 31 dias após o término da operação, observa-se que razão experimental está compatível com a simulação de incorporação crônica de um composto Tipo S padrão.

Ao analisarmos a hipótese de incorporação eventual somente para o ^{234}U , as comparações entre a razão experimental e as razões teóricas, indicam que as amostras poderiam ter sido coletadas um dia após uma incorporação por inalação, de curta duração, de um composto Tipo $\text{UO}_2(\text{F})$, ou cinco dias após uma exposição de curta duração por inalação de um composto cujos parâmetros estão descritos no *Supporting Guidance 3* da ICRP (2003).

Caso 10: Avaliação do trabalhador 215 em 2003

- Período de exposição: 127 dias;
- Data de coleta: 17/04/03 - Equivale a 127 dias após o início da exposição crônica.

Em 2003, foram coletadas amostras de fezes e urina do mesmo trabalhador 215 (caso 9), e determinou-se a concentração de urânio nessas amostras. Para este trabalhador, a atividade de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental estão apresentadas na Tabela 4.43. A metodologia de avaliação da via de incorporação foi a mesma utilizada na análise do caso 3. A descrição detalhada desta avaliação encontra-se no Anexo B.8.

Tabela 4.43: Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 215, amostras coletadas em 17/04/03.

Código do trabalhador	Função	Dias após o início da operação ^a	^{238}U		
			Fezes (mBq/dia)	Urina (mBq/dia)	Urina:Fezes líquida ^b
215	retífica	128	27,2	0,42	$1,5 \times 10^{-2}$

^adata da coleta das amostras de excreta

^bdesconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes

Ao avaliar a exposição crônica observou-se que a razão teórica está bem próxima das razões derivadas para o Tipo $\text{UO}_2(\text{UK}_2)$. Supondo uma incorporação eventual, os parâmetros aproximam-se do Tipo $\text{UO}_2(\text{UK}_2)$ ou do Tipo $\text{UO}_2(\text{UK})$ e do *Supporting Guidance 3* da ICRP (2003), indicando que a amostra pode ter sido coletada dias após a incorporação.

Este resultado não parece coerente para este indivíduo, uma vez que ele está alocado na retífica, está manipulando o urânio sinterizado que, teoricamente, deveria ser

mais insolúvel. Uma explicação plausível para este resultado é que o trabalhador pode ter, numa data próxima à coleta das amostras, substituído algum outro, tendo sido alocado em uma área onde se manipula compostos mais solúveis.

A razão experimental se aproxima das razões teóricas ($1,5 \times 10^{-2}$) considerando que a amostra foi coletada 9 dias ou mais após a inalação de um composto Tipo S, como mostra a Tabela 4.32.

Caso 11: Avaliação do trabalhador 216 em 2002

- Período de exposição: 68 dias;
- Data de coleta: 19/05/02 - Equivale a 120 dias após o início da exposição crônica de 68 dias, ou coleta da amostra 52 dias após o término da exposição.

Para este trabalhador, as atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e a razão urina:fezes experimental estão apresentadas nas Tabela 4.44.

Tabela 4.44: Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 216, amostras coletadas em 19/05/02.

Código do trabalhador	Função	Dias após o início da operação ^a	^{238}U		
			Fezes (mBq/dia)	Urina (mBq/dia)	Urina:Fezes líquida ^b
216	Retífica	120	Bg	0,22	-

^adata da coleta das amostras de excreta

^bdesconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes

Não foi possível calcular a razão urina:fezes a partir da concentração do ^{238}U nas amostras de fezes e urina. A estimativa da concentração de ^{234}U na urina, e o que foi medido na amostra de fezes, estão apresentados na Tabela 4.45.

Tabela 4.45: Atividades de de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 216, amostras coletadas em 19/05/02.

Código do trabalhador	Função	Dias após o início da operação ^a	^{234}U		
			Fezes (mBq/dia)	Urina (mBq/dia)	Urina:Fezes líquida ^b
216	retífica	120	4,9	0,38	$7,7 \times 10^{-2}$

^adata da coleta das amostras de excreta

^bdesconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes

A metodologia de avaliação da via de incorporação foi a mesma utilizada na análise dos outros casos. A descrição detalhada desta avaliação encontra-se no Anexo B.9. A partir das hipóteses testadas é possível que tenha ocorrido incorporação crônica por inalação de um composto Tipo $UO_2(UK_2)$. Também não é incompatível com a incorporação crônica de um composto padrão Tipo S.

Pode ter ocorrido alguma incorporação por inalação eventual de um composto de UO_2 com os parâmetros descritos no Supporting Guidance 3 (2003), 1 dia antes da coleta.

Caso 12: Avaliação do trabalhador 164 em 2002

- Período de exposição: 68 dias;
- Data de coleta: 15/04/02 - Equivale a 86 dias após o início da exposição crônica de 68 dias, ou coleta da amostra 18 dias após o término da exposição.

Para este trabalhador, a atividade de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental estão apresentadas nas Tabela 4.46.

Tabela 4.46: Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 164, amostras coletadas em 15/04/02.

Código do trabalhador	Função	Dias após o início da operação ^a	^{238}U		
			Fezes (mBq/dia)	Urina (mBq/dia)	Urina:Fezes líquida ^b
164	Sinterização	86	<i>Bg</i>	0,29	-

^adata da coleta das amostras de excreta

^bdesconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes

Como não foi possível calcular a razão experimental em relação ao ^{238}U , calculou-se a razão em relação ao ^{234}U , como mostra a Tabela 4.47.

Tabela 4.47: Atividades de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 164, amostras coletadas em 15/04/02.

Código do trabalhador	Função	Dias após o início da operação ^a	^{234}U		
			Fezes (mBq/dia)	Urina (mBq/dia)	Urina:Fezes líquida ^b
164	Sinterização	86	1,2	0,51	$4,2 \times 10^{-1}$

^adata da coleta das amostras de excreta

^bdesconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes

A metodologia de avaliação da via de incorporação foi a mesma utilizada na análise dos outros casos. A descrição detalhada desta avaliação encontra-se no Anexo B.10.

A hipótese mais provável é que tenha ocorrido exposição crônica por 68 dias, e que a amostra tenha sido coletada 20 dias após o término do trabalho. Existe a possibilidade de ter incorporado um composto tipo UO_2 (ICRP 2003). É difícil avaliar, porque a concentração nas fezes é baixa, levando a uma razão urina:fezes elevada.

Caso 13: Avaliação do trabalhador 141 em 2002

- Período de Exposição: 76 dias

Data de coleta: 07/04/02 - Equivale a 78 dias após o início da exposição crônica de 76 dias, ou coleta da amostra 2 dias após o término da exposição.

Para este trabalhador, as atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e a razão urina:fezes experimental estão apresentadas nas Tabela 4.48.

Tabela 4.48: Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 141, amostras coletadas em 07/04/02.

Código do trabalhador	Função	Dias após o início da operação ^a	Fezes (mBq/d)	Urina (mBq/d)	Urina:Fezes líquida ^b
141	Peneiramento	78	63,4	0,52	$8,3 \times 10^{-03}$

^adata da coleta das amostras de excreta

^bdesconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes

A metodologia de avaliação da via de incorporação foi a mesma utilizada na análise dos outros casos. A descrição detalhada das hipóteses consideradas encontra-se no Anexo B.11.

Ao avaliar a exposição crônica, observamos que a razão experimental apresenta um valor ($8,3 \times 10^{-03}$) próximo aos valores teóricos da razão urina:fezes de um composto padrão tipo S, e também de um composto Tipo $UO_2(UK_2)$.

Ao testar a hipótese de uma exposição eventual, novamente observa-se que é muito difícil definir o composto a que o trabalhador está exposto. Várias hipóteses podem ser assumidas: incorporação de composto tipo S no dia anterior à coleta da amostra, o que não parece razoável pois as amostras foram coletadas dois dias após a

exposição e incorporação de $UO_2(UK)$, $UO_2(F)$ e $UO_2(UK_2)$ cerca de cinco dias antes da coleta.

Caso 14: Avaliação do trabalhador 276 em 2002

- Período de exposição: 200 dias
- Data de coleta: 07/08/02 - Equivale a 201 dias após o início da exposição crônica de 200 dias, ou coleta da amostra 1 dia após o término da exposição.

Para este trabalhador, as atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e a razão urina:fezes experimental estão apresentadas na Tabela 4.49.

Tabela 4.49: Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 276, amostras coletadas em 07/08/02.

Código do trabalhador	Função	Dias após o início da operação ^a	Fezes (mBq/d)	Urina (mBq/d)	Urina:Fezes líquida ^b
276	Peneiramento	201	12	0,04	$3,3 \times 10^{-03}$

^adata da coleta das amostras de excreta

^bdesconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes

A metodologia de avaliação da via de incorporação foi a mesma utilizada na análise dos outros casos. A descrição detalhada das hipóteses consideradas encontra-se no Anexo B.12.

Avaliando-se a hipótese de exposição crônica via inalação ou ingestão, observa-se que a razão urina:fezes experimental ($3,3 \times 10^{-3}$) está próxima do valor teórico para ingestão ($1,2 \times 10^{-3}$), ou para inalação de compostos tipo S (7.6×10^{-3}).

Existe ainda a possibilidade de ter ocorrido uma incorporação eventual. Comparando-se a razão urina:fezes experimental com as razões derivadas a partir dos modelos teóricos, observa-se que a razão experimental está muito próxima das razões derivadas da incorporação de $UO_2(UK)$, $UO_2(F)$ e $UO_2(UK_2)$ quando as amostras de excreta são coletadas três dias após a incorporação.

Ao testar a hipótese de uma exposição eventual, é muito difícil definir o composto a que o trabalhador está exposto. Várias hipóteses podem ser assumidas:

- incorporação de um composto tipo S 1, 4 ou 5 dias antes da coleta das amostras

- incorporação de um composto tipo $\text{UO}_2(\text{UK})$ 2 a 4 dias antes da coleta das amostras
- incorporação de um composto tipo $\text{UO}_2(\text{F})$ 2 a 4 dias antes da coleta das amostras
- incorporação de um composto tipo $\text{UO}_2(\text{UK}_2)$ 2 a 5 dias antes da coleta das amostras

Este trabalhador, em especial, é quem apresenta maior risco para exposição interna na fábrica. Por essa razão, ele utiliza máscara panorâmica enquanto está desempenhando a tarefa de peneiramento.

Caso 15: Avaliação do trabalhador 276 em 2003

Data de coleta: 16/03/03 - Equivale a 85 dias após o início da exposição crônica e coleta da amostra um dia após o término da exposição.

Em 2003, foram coletadas amostras de fezes e urina do mesmo trabalhador (caso 14), e determinou-se a concentração de urânio nessas amostras. Para este trabalhador, a atividade de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental estão apresentadas na Tabela 4.50.

Tabela 4.50: Atividade de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 276, amostras coletadas em 16/03/03.

Código do trabalhador	Função	Dias após o início da operação ^a	^{238}U		
			Fezes (mBq/d)	Urina (mBq/d)	Urina:Fezes líquida ^b
276	Peneiramento	85	12	0,17	$1,4 \times 10^{-02}$

^adata da coleta das amostras de excreta

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes

A metodologia de avaliação da via de incorporação foi a mesma utilizada na análise dos outros casos. A descrição detalhada desta avaliação encontra-se no Anexo B.13.

Avaliando-se a hipótese de exposição crônica via inalação, observou-se que a razão urina:fezes experimental está próxima da razão urina:fezes teórica derivada da incorporação por inalação de $\text{UO}_2(\text{UK}_2)$.

Para o cenário de uma incorporação eventual, comparando-se a razão urina:fezes experimental com as razões derivadas a partir dos modelos teóricos, observa-se que é

muito difícil definir o composto a que o trabalhador está exposto. Várias hipóteses podem ser assumidas:

- incorporação de um composto tipo UO_2 (ICRP 2003) 2 a 5 dias antes da coleta das amostras
- incorporação de um composto tipo $\text{UO}_2(\text{UK})$ 1 ou 5 dias antes da coleta das amostras
- incorporação de um composto tipo $\text{UO}_2(\text{F})$ 1 ou 5 dias antes da coleta das amostras
- incorporação de um composto tipo $\text{UO}_2(\text{UK}_2)$ 1 dia antes da coleta das amostras

4.2.3.I – CÁLCULO DA ATIVIDADE INCORPORADA E DA DOSE EFETIVA COMPROMETIDA (UNIDADE 2)

Para todos os trabalhadores da Prensa, Retífica Sinterização e Peneiramento, foram calculadas as atividades incorporadas e as doses efetivas comprometidas, utilizando a excreção urinária e fecal e considerando a inalação como a via mais provável de exposição. Como foi descrito na Metodologia a razão 0,2 foi escolhida para representar a razão isotópica e podemos concluir que a atividade de ^{238}U incorporada é 1/5 da quantidade de ^{234}U incorporada. Quando a incorporação é calculada para o ^{238}U , esta é multiplicada por 6 e a dose calculada para ^{234}U . As atividades incorporadas e a dose efetiva para os trabalhadores da Prensa utilizando a excreção urinária e fecal, considerando incorporação via inalação de ^{234}U estão apresentadas na Tabela 4.51.

Tabela 4.51: Atividades incorporadas e dose efetiva para os trabalhadores da Prensa utilizando a excreção urinária e fecal, considerando incorporação via inalação de ^{234}U .

Caso	Código do trabalhador	Função	Simulação	Padrão de Incorporação	Excreção	I (Bq)	Dose Efetiva (Sv)	Obs ^b
1	146/2002	Prensa	S	Crônica	urinária	1,1	$7,1 \times 10^{-4}$	Após a prod
					fecal	2,5	$1,7 \times 10^{-3}$	
			S	Eventual	urinária	54,3	$4,6 \times 10^{-4}$	5º dia
					fecal	75,8	$6,4 \times 10^{-4}$	
2	146/2003	Prensa	S	Eventual	urinária	7,0	$5,9 \times 10^{-5}$	3º dia
					fecal	10	$8,5 \times 10^{-5}$	
3	232/2002	Prensa	S	Crônica	urinária	0,5	$3,0 \times 10^{-4}$	1º dia
					fecal	0,5	$3,0 \times 10^{-4}$	
			UO ₂ (F)	Eventual	urinária	0,2	$1,1 \times 10^{-6}$	
					fecal	0,2	$9,5 \times 10^{-7}$	
4	232/2003	Prensa	UO ₂ (UK ₂)	Eventual	urinária	19,8	$1,4 \times 10^{-4}$	3º dia
					fecal	47,4	$3,3 \times 10^{-4}$	
			S	Eventual	urinária	102	$8,6 \times 10^{-4}$	4º dia
					fecal	108	$9,1 \times 10^{-4}$	

No ano de 2002, no setor da Prensa, a atividade incorporada pelos trabalhadores e a dose efetiva calculadas a partir da excreção urinária, considerando a exposição crônica apresentou dois valores: $3,0 \times 10^{-4}$ e $7,1 \times 10^{-4}$ Sv, considerando incorporação de um composto Tipo S.

Supondo a incorporação eventual as doses variam de $1,1 \times 10^{-6}$ a $4,6 \times 10^{-4}$ Sv considerando as amostras coletadas em 2002. No ano de 2003 a dose efetiva comprometida apresentou valores entre $5,9 \times 10^{-5}$ e $8,6 \times 10^{-4}$ Sv. Tanto no ano de 2002 quanto em 2003 os valores são maiores que os valores apresentados na Unidade 1.

As atividades incorporadas e a dose efetiva para os trabalhadores da Retífica e Sinterização utilizando a excreção urinária e fecal, considerando incorporação via inalação de ^{234}U estão apresentadas na Tabela 4.52.

Tabela 4.52-: Atividades incorporadas e dose efetiva para os trabalhadores da Retífica e da Sinterização utilizando a excreção urinária e fecal, considerando incorporação via inalação de ^{234}U .

Caso	Código do trabalhador	Função	Simulação	Padrão de Incorporação	Excreção	I (Bq)	Dose Efetiva (Sv)	Obs ^b
5	219/2002	Retífica	S	Crônico	urinária	0,4	$3,1 \times 10^{-4}$	Após a prod
					fecal	0,2	$1,8 \times 10^{-4}$	
			S	Eventual	urinária	1,1	$9,3 \times 10^{-6}$	1º dia
					fecal	1,0	$8,2 \times 10^{-6}$	
7	275/2002	Retífica	S	Eventual	urinária	3,2	$2,7 \times 10^{-5}$	3º dia
					fecal	2,6	$2,2 \times 10^{-5}$	
8	275/2003	Retífica	S	Eventual	urinária	18,6	$1,6 \times 10^{-4}$	3º dia
					fecal	21,0	$1,8 \times 10^{-4}$	
			S	Crônico	urinária	1,9	$1,1 \times 10^{-3}$	
					fecal	1,4	$8,0 \times 10^{-4}$	
9	215/2002	Retífica	UO ₂ (F)	Eventual	urinária	0,8	$4,2 \times 10^{-6}$	1º dia
					fecal	0,5	$2,8 \times 10^{-6}$	
			UO ₂ (ICRP)	Eventual	urinária	4,2	$1,9 \times 10^{-5}$	5º dia
					fecal	3,9	$1,8 \times 10^{-5}$	
			UO ₂ (UK ₂)	Crônico	urinária	0,7	$6,1 \times 10^{-4}$	
					fecal	0,6	$5,8 \times 10^{-4}$	
			UO ₂ (UK)	Eventual	urinária	3,2	$1,9 \times 10^{-5}$	1º dia
					fecal	2,7	$1,5 \times 10^{-5}$	
10	215/2003	Retífica	UO ₂ (UK ₂)	Eventual	urinária	2,9	$2,1 \times 10^{-5}$	1º dia
					fecal	2,7	$1,9 \times 10^{-5}$	
			UO ₂ (ICRP)	Eventual	urinária	7,9	$3,6 \times 10^{-5}$	4º dia
					fecal	8,3	$3,8 \times 10^{-5}$	
			S	Eventual	urinária	1,5	$1,2 \times 10^{-5}$	9º dia
					fecal	1,5	$1,2 \times 10^{-5}$	
			S	Crônica	urinária	0,7	$4,1 \times 10^{-4}$	
					fecal	0,3	$1,9 \times 10^{-4}$	
11	216/2002	Retífica	UO ₂ (UK ₂)	Crônica	urinária	0,3	$1,4 \times 10^{-4}$	
					fecal	0,3	$1,6 \times 10^{-4}$	
			UO ₂ (ICRP 2003)	eventual	urinária	0,08	$3,8 \times 10^{-7}$	1º dia
					fecal	0,08	$3,7 \times 10^{-7}$	
12	164/2002	Sinterização	UO ₂ (ICRP 2003)	Crônica	urinária	0,06	$1,8 \times 10^{-5}$	
					fecal	0,05	$1,4 \times 10^{-5}$	

No ano de 2002, no setor da Retífica, a atividade incorporada pelos trabalhadores e a dose efetiva calculadas a partir da excreção urinária, considerando a exposição crônica apresentou dois valores: $1,4 \times 10^{-4}$ e $4,1 \times 10^{-4}$ Sv. No ano de 2003 apresentou um valor de $6,1 \times 10^{-4}$, maior que o valor encontrado em 2002.

Supondo a incorporação eventual as doses variam de $3,7 \times 10^{-7}$ a $2,7 \times 10^{-5}$ Sv considerando as amostras coletadas em 2002. No ano de 2003 a dose efetiva comprometida apresentou valores entre $1,2 \times 10^{-5}$ e $1,6 \times 10^{-4}$ Sv. A faixa de dose encontrada considerando incorporação eventual está na faixa próxima a encontrada na Unidade 1 que foi de $6,2 \times 10^{-7}$ a $9,2 \times 10^{-5}$.

No setor da Sinterização a dose efetiva devido a incorporação crônica foi de $1,8 \times 10^{-5}$ Sv . Esse valor é menor que o valor encontrado para os trabalhadores do setor da retífica em 2002.

As atividades incorporadas e a dose efetiva para o trabalhador do Peneiramento utilizando a excreção urinária e fecal, considerando incorporação via inalação de ^{234}U estão apresentadas nas Tabelas 4.53 e 4.54

Tabela 4.53-: Atividades incorporadas e dose efetiva para o trabalhador do Peneiramento em 2002 utilizando a excreção urinária e fecal, considerando incorporação via inalação de ^{234}U .

Caso	Código do trabalhador	Função	Simulação	Padrão de Incorporação	Excreção	I (Bq)	Dose Efetiva (Sv)	Obs ^b
13	141/2002	Peneiramento	S	Crônica	urinária	3,5	$2,3 \times 10^{-3}$	
					fecal	2,4	$1,5 \times 10^{-3}$	
			UO ₂ (UK ₂)	Crônica	urinária	1,3	$7,3 \times 10^{-4}$	
					fecal	2,4	$1,3 \times 10^{-3}$	
			UO ₂ (UK)	Eventual	urinária	34,7	$2,0 \times 10^{-4}$	5º dia
					fecal	45,1	$2,6 \times 10^{-4}$	
			UO ₂ (F)	Eventual	urinária	24,9	$1,3 \times 10^{-4}$	5º dia
					fecal	45,2	$2,3 \times 10^{-4}$	
			UO ₂ (UK ₂)	Eventual	urinária	58,9	$4,1 \times 10^{-4}$	5º dia
					fecal	45,1	$3,2 \times 10^{-4}$	
14	276/2002	Peneiramento	S	Crônico	urinária	0,1	$2,1 \times 10^{-4}$	
					fecal	0,3	$4,7 \times 10^{-4}$	
			S	Eventual	urinária	12,0	$1,0 \times 10^{-4}$	5º dia
					fecal	8,5	$7,2 \times 10^{-5}$	
			UO ₂ (UK)	Eventual	urinária	0,8	$4,6 \times 10^{-6}$	2º dia
					fecal	0,8	$4,7 \times 10^{-6}$	
			UO ₂ (UK)	Eventual	urinária	1,5	$8,6 \times 10^{-6}$	3º dia
					fecal	1,5	$8,9 \times 10^{-6}$	
			UO ₂ (F)	Eventual	urinária	1,1	$5,5 \times 10^{-6}$	3º dia
					fecal	1,5	$8,2 \times 10^{-6}$	
UO ₂ (UK ₂)	Eventual	urinária	0,9	$6,6 \times 10^{-6}$	2º dia			
		fecal	0,8	$5,8 \times 10^{-6}$				
UO ₂ (UK ₂)	Eventual	urinária	3,6	$2,6 \times 10^{-5}$	4º dia			
		fecal	3,6	$2,5 \times 10^{-5}$				

No ano de 2002, no setor do Peneiramento, a atividade incorporada pelo trabalhador e a dose efetiva calculadas a partir da excreção urinária, considerando a exposição crônica apresentou dois valores: $2,1 \times 10^{-4}$ e $2,3 \times 10^{-3}$ Sv. No ano de 2003 apresentou um valor de $2,0 \times 10^{-4}$ Sv, similar ao valor encontrado em 2002.

Supondo a incorporação eventual as doses variam de $4,6 \times 10^{-6}$ a $4,1 \times 10^{-4}$ Sv considerando as amostras coletadas em 2002. No ano de 2003 a dose efetiva comprometida apresentou valores entre $3,7 \times 10^{-6}$ e $4,3 \times 10^{-5}$ Sv.

Para o trabalhador 276/2002 e 276/2003 dependendo do Tipo de composto considerado no cálculo da incorporação eventual a dose chega a 1 ordem de grandeza de diferença.

Tabela 4.54-: Atividades incorporadas e dose efetiva para o trabalhador do Peneiramento em 2003 utilizando a excreção urinária e fecal, considerando incorporação via inalação de ^{234}U .

Caso	Código do trabalhador	Função	Simulação	Padrão de Incorporação	Excreção	I (Bq)	Dose Efetiva (Sv)	Obs ^b
15	276/2003	Peneiramento	UO ₂ (UK ₂)	Crônico	urinária	0,3	2,0x10 ⁻⁴	
					fecal	0,3	1,7x10 ⁻⁴	
			UO ₂ (ICRP2003)	Eventual	urinária	1,0	4,7x10 ⁻⁶	2 ^a dia
					fecal	0,8	3,7x10 ⁻⁶	
			UO ₂ (ICRP2003)	Eventual	urinária	2,2	1,0x10 ⁻⁵	3 ^o dia
					fecal	1,6	7,2x10 ⁻⁶	
			UO ₂ (ICRP2003)	Eventual	urinária	3,2	1,4 x10 ⁻⁵	4 ^o dia
					fecal	3,7	3,7x10 ⁻⁵	
			UO ₂ (UK)	Eventual	urinária	1,3	7,6x10 ⁻⁶	1 ^o dia
					fecal	1,2	6,8x10 ⁻⁶	
			UO ₂ (F)	Eventual	urinária	0,7	3,7x10 ⁻⁶	1 ^o dia
					fecal	1,2	6,2x10 ⁻⁶	
UO ₂ (F)	Eventual	urinária	8,2	4,3x10 ⁻⁵	5 ^o dia			
		fecal	8,6	4,5 x10 ⁻⁵				
UO ₂ (UK ₂)	Eventual	urinária	1,2	8,4x10 ⁻⁶	1 ^o dia			
		fecal	1,2	8,3x10 ⁻⁶				

4.2.2.II – ANÁLISE DOS DADOS DE BIONÁLISE *IN VITRO* DO GRUPO DE TRABALHADORES DA PRECIPITAÇÃO E LEITO FLUIDIZADO

Este grupo é formado por trabalhadores que estão alocados no setor da Precipitação do TCAU e no setor do Leito Fluidizado. Tais trabalhadores estão expostos ao urânio enriquecido na forma de hexafluoreto de urânio (UF₆), aos produtos da hidrólise do UF₆ e à precipitação do tricarbonato de amônio e uranila (TCAU). A decomposição térmica do TCAU e subsequente redução para UO₂ processa-se em forno de leito fluidizado. Os espaços físicos onde ocorrem essas etapas do processo de reconversão são ambientes de trabalho interligados.

Durante o ano de 2002, essa etapa do processo esteve em funcionamento no período de 19/01/2002 a 22/12/2002 (347 dias). Os resultados das concentrações de ²³⁸U presentes nas amostras de fezes e urina, coletadas nos meses de abril, maio, agosto e outubro, estão apresentados, nas Tabelas 4.55, 4.56 e 4.57.

Tabela 4.55: Atividades de urânio nas amostras de urina e fezes dos trabalhadores coletadas no mês de abril.

Código do trabalhador	Função	Massa ^a (g cinza)	²³⁸ U fezes (mBq/dia)	²³⁴ U fezes (mBq/dia)	²³⁸ U/ ²³⁴ U fezes	²³⁸ U (mBq/L) urina
171	Precipitação	2,4	21,5 ± 4,4	35,1 ± 5,8	0,6	1,7
163	Precipitação	1,4	10,1 ± 3,2	13,2 ± 3,7	0,8	1,1
181	Precipitação	2,0	8,4 ± 2,5	7,8 ± 2,3	1,1	0,2

^a massa da amostra de fezes calcinada

Tabela 4.56: Atividades de urânio nas amostras de urina e fezes coletadas no mês de maio.

Código do trabalhador	Função	Massa ^a (g cinza)	²³⁸ U fezes (mBq/dia)	²³⁴ U fezes (mBq/dia)	²³⁸ U/ ²³⁴ U fezes	²³⁸ U (mBq/L) urina
236	Leito Fluidizado	4,7	267,8 ± 35,4	1270,2 ± 14,7,0	0,2	0,69
224	Leito Fluidizado	2,0	45,5 ± 6,1	114,6 ± 11,7	0,4	1,27
230	Leito Fluidizado	5,2	25,4 ± 6,9	94,3 ± 13,6	0,3	<LMD
227	Leito Fluidizado	3,3	52,89 ± 7,89	195,6 ± 19,8	0,3	0,56
228	Leito Fluidizado	2,2	11,39 ± 2,59	13,4 ± 2,8	0,8	<LMD

^a massa da amostra de fezes calcinada

Tabela 4.57: Atividades de urânio nas amostras de urina e fezes dos trabalhadores coletadas nos meses de agosto e outubro.

Código do trabalhador	Função	Massa ^a (g cinza)	²³⁸ U fezes (mBq/dia)	²³⁴ U fezes (mBq/dia)	²³⁸ U/ ²³⁴ U fezes	²³⁸ U (mBq/L) urina
257	Precipitação	1,2	76,8 ± 8,2	360,1 ± 31,7	0,21	2,27
328	Área de efluente	3,5	11,6 ± 4,1	18,9 ± 5,1	0,61	<LMD

^a massa da amostra de fezes calcinada

Analisando a concentração de ²³⁸U nas amostras de urina dos trabalhadores da preparação de pó e do grupo de trabalhadores da preparação da pastilha, observa-se na Figura 4.13, que muitos trabalhadores envolvidos nas etapas de precipitação e de reconversão, e da produção de pó, apresentam concentração de ²³⁸U na urina maior que o grupo que trabalha no setor de preparação das pastilhas (peneiramento, prensa, sinterização e retífica). Este resultado é esperado, uma vez que os compostos manipulados nessas etapas do processo são mais solúveis que o UO₂, manipulado na produção da pastilha.

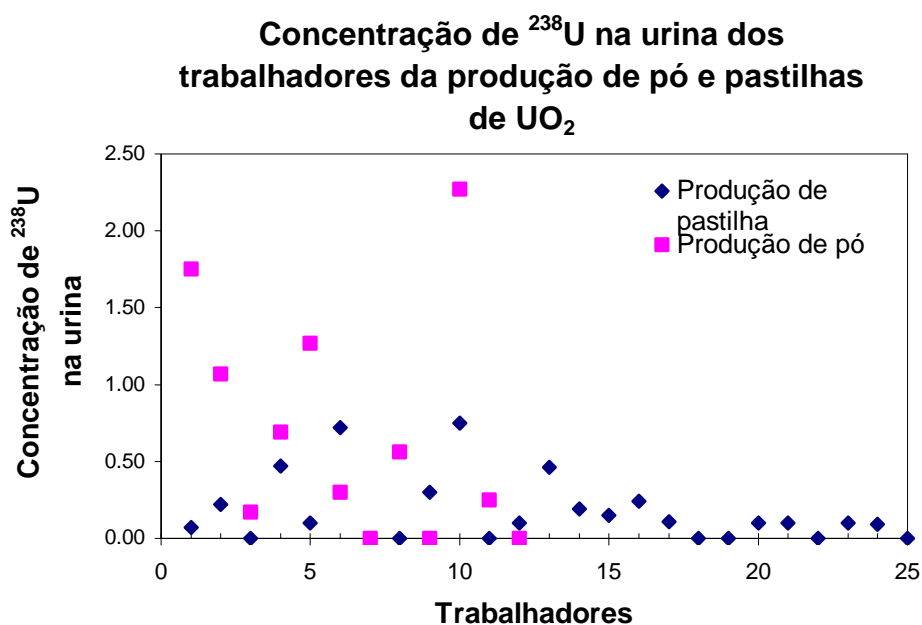


Figura 4.13: Concentração de ²³⁸U nas amostras de urina dos grupos de trabalhadores da preparação de pó e do grupo da preparação da pastilha.

Para uma melhor avaliação dos dados de excreção, dividiu-se os trabalhadores conforme as atividades. Considerou-se o Grupo 1 como o grupo com razão isotópica entre as concentrações de ²³⁸U e ²³⁴U nas fezes maior que 0,6, conforme apresentado na Tabela 4.58, e o Grupo 2 como sendo o grupo com razão isotópica entre as

concentrações de ^{238}U e ^{234}U nas fezes menor que 0,6, conforme apresentado na Tabela 4.59. Aplicou-se o mesmo critério descrito anteriormente, ao se analisar o grupo de trabalhadores da preparação de pastilhas.

Tabela 4.58: Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes dos trabalhadores do Grupo 1.

Código do trabalhador	Função	Dias após início da operação ^a	Massa ^b (g cinza)	^{238}U fezes (mBq/dia)	^{234}U fezes (mBq/dia)	$^{238}\text{U}/^{234}\text{U}$ fezes	^{238}U (mBq/L) urina
171	Precipitação	96	2,4	21,5 ± 4,4	35,1 ± 5,8	0,61	1,75
163	Precipitação	88	1,4	10,1 ± 3,2	13,2 ± 3,7	0,76	1,07
181	Precipitação	88	2,0	8,4 ± 2,5	7,8 ± 2,3	1,08	0,17
228	Leito Fluidizado	119	2,2	11,3 ± 2,5	13,4 ± 2,8	0,84	<LMD
328	Área de Efluente	211	3,5	11,5 ± 4,1	18,9 ± 5,1	0,61	<LMD

^a data da coleta das amostras de excreta

^b massa da amostra de fezes calcinada

Tabela 4.59: Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes dos trabalhadores do Grupo 2

Código do trabalhador	Função	Dias após o início da operação ^a	Massa (g cinza) ^b	^{238}U fezes (mBq/dia)	^{234}U fezes (mBq/dia)	$^{238}\text{U}/^{234}\text{U}$ fezes	^{238}U (mBq/L) urina
236	Leito Fluidizado	112	4,0	267,8±35,4	1270,2±147,0	0,21	0,69
224	Leito Fluidizado	123	2,3	45,5±6,1	114,6 ±11,7	0,40	1,27
227	Leito Fluidizado	112	3,9	52,8±7,8	195,6±19,8	0,27	0,56
257	Precipitação	219	1,19	76,8±8,2	360,1± 31,7	0,21	2,27

^a data da coleta das amostras de excreta

^b massa da amostra de fezes calcinada

AValiação DA RAZÃO URINA:FEZES

Para realizar esta avaliação, tornou-se necessário analisar as concentrações de urânio nas fezes e na urina, descontando a contribuição da exposição ambiental.

Análise do ^{238}U nas amostras de fezes

Na Tabela 4.60 estão apresentados os valores de concentrações de urânio nas amostras de fezes dos trabalhadores do Grupo 2, após o desconto da contribuição ambiental conforme item 3.2.3 do Capítulo 3 (Metodologia).

Do grupo de quatro trabalhadores expostos, após o desconto da contribuição ambiental, todas as amostras apresentaram valores positivos de concentração de ^{238}U nas fezes, caracterizando a exposição ocupacional.

Tabela 4.60: Atividades de ^{238}U nas amostras de fezes dos trabalhadores do Grupo 2, após o desconto da contribuição da exposição ambiental.

Código do trabalhador	Função	Dias após início da operação ^a	Massa (g cinza) ^b	^{238}U (mBq/dia)	^{238}U (mBq/dia) líquido ^c
236	Leito Fluidizado	112	4,7	267,8	240,0
224	Leito Fluidizado	123	2,0	45,5	33,5
227	Leito Fluidizado	112	3,3	52,8	33,3
257	Precipitação	219	1,2	76,8	69,7

^a data da coleta das amostras de excreta

^b massa da amostra de fezes calcinada

^c Concentrações de fezes nas amostras de fezes dos trabalhadores após o desconto da contribuição ambiental.

Análise das atividades de ^{238}U nas amostras de urina

Das quatro amostras analisadas, todas apresentaram valores superiores aos valores referentes à exposição ambiental, que é 0,0916 mBq/L, que é a média geométrica de urânio nas amostras de urina de pessoas não ocupacionalmente expostas na cidade do Rio de Janeiro.

Na Tabela 4.61 estão apresentados os valores de concentrações de urânio nas amostras de urina dos trabalhadores do Grupo 2, após o desconto da contribuição ambiental, conforme descrito no item 3.2.3.2 do Capítulo 3 (Metodologia)

Tabela 4.61: Atividades de ^{238}U nas amostras de urina dos trabalhadores do Grupo 2, após o desconto da contribuição da exposição ambiental.

Código do trabalhador	Função	Dias após início da operação ^a	Amostra de urina		
			^{238}U (mBq/L)	^{238}U (mBq/dia)	^{238}U (mBq/dia) líquido ^b
236	Leito fluidizado	112	0,7	1,0	0,84
224	Leito fluidizado	123	1,3	1,8	1,65
227	Leito fluidizado	112	0,6	0,8	0,66
257	Precipitação	219	2,3	3,2	3,05

^a data da coleta das amostras

^b Concentrações de urânio nas amostras de urina dos trabalhadores após o desconto da contribuição ambiental.

Análise da razão urina:fezes

A partir das concentrações de ^{238}U nas amostras de fezes e de urina, calculou-se a razão urina:fezes experimental dos trabalhadores do Grupo 2, sem descontar a contribuição ambiental, descontando-se a contribuição da exposição ambiental nas amostras de urina e fezes, e descontando a contribuição ambiental somente nas amostras de fezes. As razões urina:fezes desses trabalhadores estão apresentadas na Tabela 4.62.

Tabela 4.62: Razões entre as atividades de urânio na urina e nas fezes (urina:fezes) experimentais calculadas a partir do dados dos trabalhadores do Grupo 2 após o desconto da contribuição da exposição ambiental.

Código do trabalhador	Função	Dias após o início da operação ^a	Urina:fezes	Urina:fezes (líquido ^b)
236	Leito Fluidizado	112	$3,6 \times 10^{-03}$	$3,5 \times 10^{-03}$
224	Leito Fluidizado	123	$3,9 \times 10^{-02}$	$4,9 \times 10^{-02}$
227	Leito Fluidizado	112	$1,5 \times 10^{-02}$	$2,0 \times 10^{-02}$
257	Precipitação	219	$4,1 \times 10^{-02}$	$4,4 \times 10^{-02}$

^a data da coleta das amostras de excreta

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes

SIMULAÇÃO DO TIPO DE INCORPORAÇÃO

O processo de produção do pó de UO_2 é realizado na Unidade 2 da FCN. Os setores onde ocorrem as etapas de precipitação e reconversão funcionaram no período de fabricação do pó de UO_2 : de 09/01/2002 a 22/12/2002 (347 dias).

Nessas etapas do processo, os compostos de urânio manipulados são o hexafluoreto de urânio (UF_6), classificado, pela publicação 66 da ICRP (1993), como solúveis tipo F. e o tricarbonato de amônio e uranila (TCAU) que é mais solúvel do que o UO_2 . No mesmo ambiente de trabalho é manipulado também o urânio na forma de UO_2 , classificado como composto insolúvel (tipo S), de acordo com a publicação 66 da ICRP (1993) e do *Supporting Guidance 3* (ICRP, 2003).

Neste trabalho, as razões experimentais foram comparadas com as razões derivadas a partir dos parâmetros de retenção das publicações da ICRP (1994; 2003) e dos estudos *in vivo* disponíveis na literatura (Stradling e cols, 2002; Ansoberlo e cols, 2002).

As simulações dos cenários de incorporação são mostradas a seguir, separadamente, conforme a função exercida pelo trabalhador na Unidade 2 da FCN. As razões urina:fezes derivadas a partir dos parâmetros sugeridos pela ICRP (1994) e pelos dados da literatura serão chamados de razão urina:fezes teórica. O procedimento utilizado é o mesmo descrito anteriormente para a análise dos dados dos trabalhadores alocados nos setores de produção de pastilha.

ESTUDO DE CASOS

Caso 16: Avaliação do trabalhador 236

- Período de exposição: 111 dias
- Data de coleta: 01/05/02 - Equivale a 112 dias após o início da exposição crônica de 111 dias, ou coleta da amostra um dia após o término da exposição.

Para este trabalhador, as atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental estão apresentadas na Tabela 4.63. A metodologia de avaliação da via de incorporação foi a mesma utilizada anteriormente. A descrição detalhada encontra-se no Anexo B.14.

Tabela 4.63: Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 236, amostras coletadas em 01/05/02.

Código do trabalhador	Função	^{238}U		
		Fezes (mBq/dia)	Urina (mBq/dia)	Urina:Fezes líquida ^a
236	Leito Fluidizado	240	0,84	$3,5 \times 10^{-03}$

^a desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes

Ao avaliar a possibilidade da ocorrência de exposição crônica via inalação e ingestão durante o período de produção, observa-se que a razão urina:fezes experimental está próxima dos valores das razões urina:fezes teóricas para ingestão de UO_2 , ($1,2 \times 10^{-3}$) e inalação de compostos Tipo S ($5,8 \times 10^{-3}$). No entanto, sabe-se que o trabalhador pode estar exposto a compostos de diferentes solubilidades, uma vez que passa a maior parte do tempo em ambiente com maior probabilidade de exposição a compostos solúveis.

Existe ainda a possibilidade de ter ocorrido uma exposição eventual.

Comparando-se as razões urina:fezes experimental com as razões derivadas a partir dos modelos teóricos, várias hipóteses podem ser assumidas:

- incorporação por inalação de um composto tipo S 5 dias antes da coleta das amostras
- incorporação por inalação de um composto tipo $\text{UO}_2(\text{UK})$ 2 ou 3 dias antes da coleta das amostras
- incorporação por inalação de um composto tipo $\text{UO}_2(\text{UK}_2)$ 2 ou 4 dias antes da coleta das amostras
- incorporação por ingestão de um composto solúvel 4 dias antes da coleta das amostras

Caso 17: Avaliação do trabalhador 224

- Período de exposição: 122 dias
- Data de coleta: 15/05/02 - Equivale a 123 dias após o início da exposição crônica de 122 dias, ou coleta da amostra um dia após o término da exposição.

Para este trabalhador, as atividades de ^{238}U nas amostras de urina, e de fezes e a razão urina:fezes experimental estão apresentadas nas Tabela 4.64. A metodologia de

avaliação da via de incorporação foi a mesma utilizada anteriormente. A descrição detalhada encontra-se no Anexo B.15.

Tabela 4.64: Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 224, amostras coletadas em 15/05/02

Código do trabalhador	Função	^{238}U		
		Fezes (mBq/dia)	Urina (mBq/dia)	Urina:Fezes (líquido)
224	Leito Fluidizado	33,4	1,6	$4,8 \times 10^{-02}$

^a desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes

Ao avaliar a exposição crônica, observa-se que a razão urina:fezes experimental está próxima dos valores das razões urina:fezes teóricas para inalação de UO_2 (UK), $\text{UO}_2(\text{F})$, UO_2 (UK₂) e ICRP 2003 que são valores entre $1,4 \times 10^{-2}$ e $7,6 \times 10^{-2}$.

As funções desempenhadas por este trabalhador são as mesmas do caso 16. Sabe-se que o referido trabalhador pode estar exposto a compostos de diferentes solubilidades, uma vez que passa a maior parte do tempo em ambiente com maior probabilidade de exposição a compostos solúveis.

Existe ainda a possibilidade de ter ocorrido uma incorporação eventual por inalação. No momento que vai desempenhar suas tarefas no leito fluidizado, onde manipula o urânio na forma de UO_2 , usa máscara panorâmica, pois o risco de incorporação é muito alto. A atividade de ^{238}U encontrada na sua urina é 1,6 mBq/dia, valor mais elevado que os apresentados para os trabalhadores expostos a UO_2 , alocados nos setores relacionados à produção de pastilha e Unidade 1 indicando uma incorporação de compostos solúveis. É possível que este trabalhador esteja exposto a uma mistura de compostos. Comparando-se as razões urina:fezes experimental com as razões derivadas a partir dos modelos teóricos, é compatível com a incorporação de compostos Tipo M, $\text{UO}_2(\text{UK})$, $\text{UO}_2(\text{F})$ e UO_2 ICRP 2003. Várias hipóteses podem ser assumidas:

- incorporação por inalação de um composto tipo UO_2 (ICRP 2003) 5 dias antes da coleta das amostras
- incorporação por inalação de um composto tipo $\text{UO}_2(\text{UK})$, $\text{UO}_2(\text{F})$ e UO_2 ICRP 2003 1 dia antes da coleta da amostra

- incorporação por inalação de um composto tipo M 4 dias antes da coleta da amostra
- incorporação por ingestão de um composto solúvel 1 dia antes da coleta das amostras

- Caso 18: Avaliação do trabalhador 227

- Período de exposição: 111 dias
- Data de coleta: 01/05/02 - Equivale a 112 dias após o início da exposição crônica de 111 dias, ou coleta da amostra um dia após o término da exposição.

Para este trabalhador, as atividades de ^{238}U nas amostras de urina e de fezes e a razão urina:fezes experimental estão apresentadas na Tabela 4.65. A metodologia de avaliação da via de incorporação foi a mesma utilizada anteriormente. A descrição detalhada encontra-se no Anexo B.16.

Tabela 4.65: Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e de fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 227, amostras coletadas em 01/05/02

Código do trabalhador	Função	^{238}U		
		Fezes (mBq/dia)	Urina (mBq/dia)	Urina:Fezes (líquido ^a)
227	Leito Fluidizado	33,3	0,7	$2,0 \times 10^{-02}$

^a desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes

Na avaliação da exposição crônica, observa-se que a razão urina:fezes experimental está próxima dos valores das razões urina:fezes teóricas para inalação de composto Tipo $\text{UO}_2(\text{UK})$, $\text{UO}_2(\text{F})$, $\text{UO}_2(\text{UK}_2)$, UO_2 ICRP 2003 (*Supporting Guidance 3* da ICRP, 2003), que são valores entre $1,4 \times 10^{-2}$ e $3,6 \times 10^{-2}$. As funções desempenhadas por esse trabalhador são as mesmas do caso 16 e 17.

A possibilidade da ocorrência de uma incorporação eventual também não pode ser descartada.

Comparando-se a razão urina:fezes experimental com as razões derivadas a partir dos modelos teóricos, é compatível com a incorporação de compostos Tipo $\text{UO}_2(\text{UK})$, $\text{UO}_2(\text{F})$, $\text{UO}_2(\text{UK}_2)$ e UO_2 ICRP 2003, razões teóricas variando de $1,1 \times 10^{-2}$ a $7,5 \times 10^{-2}$. Várias hipóteses podem ser assumidas:

- incorporação por inalação de um composto tipo $UO_2(UK)$, $UO_2(F)$, $UO_2(UK2)$ e UO_2 ICRP 2003 1 e 5 dias antes da coleta das amostras
- incorporação por inalação de um composto tipo M 3 dias antes da coleta das amostras
- incorporação por ingestão de um composto solúvel 1 dia antes da coleta das amostras

Caso 19: Avaliação do trabalhador 257

- Período de exposição: 218 dias
- Data de coleta: 16/08/02 - Equivale a 219 dias após o início da exposição crônica de 218 dias, ou coleta da amostra um dia após o término da exposição.

Para este trabalhador, as atividades de ^{238}U nas amostras de urina e de fezes e a razão urina:fezes experimental estão apresentadas na Tabela 4.66. A metodologia de avaliação da via de incorporação foi a mesma utilizada anteriormente. A descrição detalhada encontra-se no Anexo B.17.

Tabela 4.66: Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e de fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 227, , amostras coletadas em 16/08/02

Código do trabalhador	Função	^{238}U		
		Fezes (mBq/dia)	Urina (mBq/dia)	Urina:Fezes líquido ^a
257	Precipitação	69,7	3,1	$4,4 \times 10^{-02}$

^a desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes

Na avaliação da exposição crônica, comparando-se as razões urina:fezes experimental ($4,4 \times 10^{-2}$) com as razões teóricas, observa-se que a razão urina:fezes experimental está próxima dos valores da razão urina:fezes teórica para inalação de $UO_2(UK)$, $UO_2(F)$ e $UO_2(UK2)$, que são valores entre $2,0 \times 10^{-2}$ e $5,5 \times 10^{-2}$. A razão experimental também está próxima da razão teórica para ingestão de compostos solúveis.

Este trabalhador está envolvido na precipitação do UF_6 , composto caracterizado como solúvel. No entanto, passa a maior parte do tempo em ambiente onde pode haver exposição a TCAU e UO_3 , ou mesmo UO_2 . A atividade de ^{238}U encontrada na urina dele

é 3,0 mBq/dia, valor mais elevado que os apresentados para os trabalhadores expostos a UO_2 , alocados nos setores relacionados à produção de pastilha e Unidade 1.

A exposição eventual pode ter ocorrido ao assumir que a amostra foi coletada no dia seguinte até cinco dias após a exposição. Comparando-se as razões urina:fezes experimental com as razões derivadas a partir dos modelos teóricos, observa-se que a razão experimental aproxima-se mais da razão obtida pela simulação de incorporação de um composto tipo M, considerando que a amostra foi coletada no quarto dia. A razão experimental também está próxima da razão teórica da incorporação por ingestão de um composto solúvel 1 dia antes da coleta das amostras.

4.2.3.II CÁLCULO DA ATIVIDADE INCORPORADA E DA DOSE EFETIVA COMPROMETIDA DO GRUPO DE TRABALHADORES DA PRECIPITAÇÃO E DO LEITO FLUIDIZADO

Para todos os trabalhadores do Leito Fluidizado e da Precipitação foram calculadas as atividades incorporadas e as doses efetivas comprometidas, utilizando a excreção urinária e fecal e considerando a inalação como a via mais provável de exposição. Como foi descrito na Metodologia a razão 0,2 foi escolhida para representar a razão isotópica e podemos concluir que a atividade de ^{238}U incorporada é 1/5 da quantidade de ^{234}U incorporada. Quando a incorporação é calculada para o ^{238}U , esta é multiplicada por 6 e a dose calculada para ^{234}U .

As atividades incorporadas e a dose efetiva para os trabalhadores do Leito Fluidizado utilizando a excreção urinária e fecal, considerando incorporação via inalação de ^{234}U estão apresentadas nas Tabelas 4.67

Tabela 4.67-: Atividades incorporadas e dose efetiva para os trabalhadores dos setor do Leito Fluidizado utilizando a excreção urinária e fecal, considerando incorporação via inalação de ^{234}U .

Caso	Código do trabalhador	Função	Simulação	Padrão de incorporação	Excreção	I (Bq)	Dose Efetiva (Sv)	Obs ^b			
16	236/2002	Leito Fluidizado	S	Crônico	urinária	3,9	$3,7 \times 10^{-3}$				
					fecal	5,8	$5,5 \times 10^{-3}$				
			S	Eventual	urinária	253	$2,1 \times 10^{-3}$				
					fecal	171	$1,4 \times 10^{-3}$	5º dia			
			UO ₂ (UK)	Eventual	urinária	16,6	$9,6 \times 10^{-5}$				
					fecal	16,3	$9,4 \times 10^{-5}$	2º dia			
			UO ₂ (UK)	Eventual	urinária	31,1	$1,8 \times 10^{-4}$				
					fecal	31,0	$1,8 \times 10^{-4}$	3º dia			
			UO ₂ (UK ₂)	Eventual	urinária	76,8	$5,4 \times 10^{-4}$				
					fecal	72,0	$5,1 \times 10^{-4}$	4º dia			
			17	224/2002	Leito Fluidizado	UO ₂ (UK)	Crônico	urinária	1,4	$1,0 \times 10^{-3}$	
								fecal	0,8	$5,7 \times 10^{-4}$	
UO ₂ (F)	Crônico	urinária				1,0	$6,3 \times 10^{-4}$				
		fecal				0,8	$5,1 \times 10^{-4}$				
UO ₂ (UK ₂)	Crônico	urinária				2,7	$2,3 \times 10^{-3}$				
		fecal				0,8	$6,9 \times 10^{-4}$				
UO ₂ (ICRP 2003)	Crônico	urinária				0,5	$2,7 \times 10^{-4}$				
		fecal				0,8	$4,4 \times 10^{-4}$				
UO ₂ (ICRP 2003)	Eventual	urinária				35,0	$1,6 \times 10^{-4}$				
		fecal				24,3	$1,1 \times 10^{-4}$	5º dia			
UO ₂ (UK)	Eventual	urinária				12,4	$7,1 \times 10^{-5}$				
		fecal				3,3	$1,9 \times 10^{-5}$	1º dia			
UO ₂ (F)	Eventual	urinária	6,6	$3,5 \times 10^{-5}$							
		fecal	3,3	$1,7 \times 10^{-5}$	1º dia						
M	Eventual	urinária	11,6	$3,6 \times 10^{-5}$							
		fecal	10,8	$3,4 \times 10^{-5}$	4º dia						

Tabela 4.67 (continuação)-: Atividades incorporadas e dose efetiva para os trabalhadores do setor do Leito Fluidizado utilizando a excreção urinária e fecal, considerando incorporação via inalação de ^{234}U .

Caso	Código do trabalhador	Função	Simulação	Padrão de incorporação	Excreção	I (Bq)	Dose Efetiva (Sv)	Obs ^b
18	227/2002	Leito Fluidizado	UO ₂ (ICRP)	Crônica	urinária	0,7	$3,5 \times 10^{-4}$	
					fecal	0,8	$4,1 \times 10^{-4}$	
			UO ₂ (UK)	Crônica	urinária	0,7	$4,2 \times 10^{-4}$	
					fecal	0,8	$5,2 \times 10^{-4}$	
			UO ₂ (F)	Crônica	urinária	0,5	$2,7 \times 10^{-4}$	
					fecal	0,8	$4,7 \times 10^{-4}$	
			UO ₂ (UK ₂)	Crônica	urinária	1,2	$9,7 \times 10^{-4}$	
					fecal	0,8	$6,3 \times 10^{-4}$	
			M	Eventual	urinária	4,8	$1,5 \times 10^{-5}$	
					fecal	4,8	$1,5 \times 10^{-5}$	3º dia
			UO ₂ (ICRP 2003)	Eventual	urinária	0,9	$4,2 \times 10^{-6}$	
					fecal	3,3	$1,5 \times 10^{-5}$	1º dia
			UO ₂ (ICRP 2003)	Eventual	urinária	15,3	$6,9 \times 10^{-5}$	
					fecal	24,4	$1,1 \times 10^{-4}$	5º dia
			UO ₂ (UK)	Eventual	urinária	5,4	$3,1 \times 10^{-5}$	
					fecal	3,3	$1,9 \times 10^{-5}$	1º dia
			UO ₂ (UK)	Eventual	urinária	46,7	$2,7 \times 10^{-4}$	
					fecal	23,8	$1,4 \times 10^{-4}$	5º dia
UO ₂ (F)	Eventual	urinária	2,9	$1,5 \times 10^{-5}$				
		fecal	3,3	$1,7 \times 10^{-5}$	1º dia			
UO ₂ (F)	Eventual	urinária	33,6	$1,8 \times 10^{-4}$				
		fecal	23,8	$1,2 \times 10^{-4}$	5º dia			
UO ₂ (UK ₂)	Eventual	urinária	4,9	$3,5 \times 10^{-5}$				
		fecal	3,3	$2,3 \times 10^{-5}$	1º dia			

No ano de 2002, no setor do Leito Fluidizado, a atividade incorporada pelo trabalhador e a dose efetiva calculadas a partir da excreção urinária, considerando a exposição crônica apresentou valores que variaram de : $2,7 \times 10^{-4}$ e $3,7 \times 10^{-3}$ Sv.

Supondo a incorporação eventual as doses variam de $1,5 \times 10^{-5}$ a $2,1 \times 10^{-3}$ Sv considerando as amostras coletadas em 2002. Dependendo da avaliação e da escolha do tipo de composto a dose efetiva calculada pode diferenciar em 1 ordem de grandeza.

As atividades incorporadas e a dose efetiva para o trabalhador da Precipitação utilizando a excreção urinária e fecal, considerando incorporação via inalação de ^{234}U estão apresentadas na Tabela 4.68

Tabela 4.68 Atividade incorporada e dose efetiva para o trabalhador do setor de Precipitação da Unidade 2 utilizando a excreção urinária e fecal considerando incorporação via inalação de ^{234}U

Caso	Código do trabalhador	Função	Simulação	Padrão de incorporação	Excreção	I (Bq)	Dose Efetiva (Sv)	Obs ^b
19	257/2002	Precipitação	UO2 (UK)	Crônica	urinária	1,9	$2,4 \times 10^{-3}$	
					fecal	1,6	$2,0 \times 10^{-3}$	
			UO2(F)	Crônica	urinária	1,3	$1,5 \times 10^{-3}$	
					fecal	1,6	$1,8 \times 10^{-3}$	
			UO2 (UK ₂)	Crônica	urinária	3,6	$5,5 \times 10^{-3}$	
					fecal	1,6	$2,5 \times 10^{-3}$	
			M	Eventual	urinária	22,4	$7,0 \times 10^{-5}$	
					fecal	22,6	$7,0 \times 10^{-5}$	

a – radionuclídeo usado para o cálculo da dose efetiva comprometida

b- dia referente a coleta de amostras (dias após a incorporação única)

No ano de 2002, no setor da Precipitação, a atividade incorporada pelo trabalhador e a dose efetiva calculadas a partir da excreção urinária, considerando a exposição crônica apresentou valores que variaram entre $1,5 \times 10^{-3}$ e $5,5 \times 10^{-3}$ Sv.

Supondo a incorporação eventual a dose encontrada foi de $7,0 \times 10^{-5}$ Sv.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

- O presente trabalho nos permitiu chegar às seguintes conclusões quanto ao grau de contaminação interna por urânio nos trabalhadores na Fábrica de Combustível Nuclear (FCN) das Indústrias Nucleares do Brasil (INB):
- Ao comparar as razões urina:fezes experimentais dos trabalhadores alocados na Unidade 1 com os valores teóricos derivados a partir dos parâmetros de retenção pulmonar publicados para UO_2 , conclui-se que as doses efetivas comprometidas variam de $6,2 \times 10^{-7}$ Sv a $9,2 \times 10^{-5}$ Sv, considerando que houve exposição eventual.
- Ao comparar as razões urina:fezes experimentais dos trabalhadores alocados na Unidade 2 na parte de preparação da pastilha (peneiramento, prensa, sinterização e retífica) as doses efetivas comprometidas, considerando exposição crônica, variam de $1,8 \times 10^{-5}$ Sv a $2,3 \times 10^{-5}$ Sv. Considerando exposição eventual as doses variam de $3,7 \times 10^{-7}$ Sv a $4,6 \times 10^{-4}$ Sv. Observou-se a ocorrência de ingestão de compostos insolúveis.
- Os setores do Leito Fluidizado e da Precipitação os trabalhadores estão expostos a diferentes compostos. Nesta etapa do processo, os trabalhadores, além de estarem expostos ao produto final – que é o pó de UO_2 – estão expostos aos produtos intermediários que fazem parte do processo. Um dos compostos mais importantes é o TCAU, que é mais solúvel que o UO_2 . A concentração de urânio na urina indica que houve incorporação de um composto mais solúvel. Nos setores do Leito Fluidizado e da Precipitação, os trabalhadores estão expostos a diferentes compostos e apresentaram dose efetiva comprometida variando de $2,7 \times 10^{-4}$ Sv a $5,5 \times 10^{-5}$ Sv, quando consideramos a exposição crônica. Considerando a incorporação eventual as doses variaram de $1,5 \times 10^{-5}$ Sv a $2,1 \times 10^{-3}$ Sv. Neste setor constatou-se a incorporação por ingestão de compostos

mais solúveis. Essas doses são duas ordens de grandeza maiores que as doses apresentadas na Unidade 1.

- Observou-se que dependendo do tipo de composto incorporado, a dose efetiva comprometida calculada poderia variar de até uma ordem de grandeza. Isto indica que há necessidade de realizar um estudo específico de solubilidade pulmonar com os compostos de urânio manipulados na Fábrica de Combustível Nuclear.
- As doses efetivas comprometidas nos anos de 2002 e 2003 são relativamente baixas, em geral, menores do que os limites derivados para o público.

BIBLIOGRAFIA

Anke, M., Ihnat, M. e Stoepler, M., 2004 Metal and their compounds in Elements and their compounds in the environmental (2a. Ed) WILEY-VCH Vol 1

Ansoborlo, E., Chazel, V., Houpert P., Hengé-Napoli, Paquet, F. ,1997, Interprétation des données physico-chimiques et biocinétiques pour le calcul de dose: exemple d' un composé industriel UO₂ appauvri fabriqué pour le combustible MOX, **Radioprotection**, **32 no. 5**, pp **603-615**

Ansoborlo, E, Hodgson, A., Stradling, G.N., , Hodgson, S., Métivier, H., Hengé-Napoli, M.H., Jarvis, N.S., Biirchal, A. ,1998, Exposure implications for uranium aerosols formed at a new laser enrichment facility: application of the ICRP respiratory tract and systemic model , **Radiation Protection Dosimetry**, **79 nos. 1-4**, pp **23-27**

Ansoborlo, E., Chazel, V., Hengé-Napoli, M.H., Pihet, P., Rannou, A., Bailey, M.R., Stradling, N., 2002, Determination of the Physical and Chemical Properties, Biokinetics, and dose coefficients of Uranium compounds handled during nuclear fuel fabrication in France **Health Phys**, **82 (3):279**;

Azeredo, A.M.G.F., Melo, D.R., Dantas, B.M., Oliveira C.A.N. 1991, An optimized method to simultaneous determination of thorium and uranium in excreta samples **Radiation Protection Dosimetry** **37 pp. 54-55**

Azeredo, A.M.G.F., Lorenço, M.C., Dantas, A.L.A. e Dantas, B.M., 2003, Performance of IRD-WBC HPGe Detection System for low energy photon emitters in lungs. **Radiation Protection Dosimetry** **105 pp. 483-485**

Altshuller, B. e Pasternack, B., 1963, Statistical measures of the lower limit of detection of a radioactivity counter. **Health Phys**. **9**, p. **293-298**

Baglan, N., Cossonnet, C., Tromprier F., Ritt, J., and Bérard, P.; 1999. Implementation of ICP-MS Protocols for Uranium Urinary Measurements in Worker Monitoring. *Health Phys.* **77 (44): 455-461;**

Byrne, A.R. and Benedik.,L. 1991 - Uranium content of blood, urine and hair of exposed and non-exposed persons determined by radiochemical neutron activation analysis, with emphasis on quality control. *The Science of Total Environment*, **107 (1991) 143 – 157.**

Ch Zarkadas, Karydas, AG., Paradellis, T. 2001 Determination of uranium in human urine by total reflection X-ray fluorescence. *Spectrochimica Acta Part B* **56 , 2505 - 2511**

Chazel V, Houpert, P., Paquet, F., Ansorbolo, E., 2001 , Effect of absorption parameters on calculation of the dose coefficient: example of classification of industrial uranium compounds. *Radiation Protection Dosimetry* **94 no. 3 pp. 261 - 268**

CNEN NN – 3.01, Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica, Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2005

Dang,H.S., Pullat ,V.R. and Pillai, K.C. , **1992** – Determining the normal concentration of uranium in urine and application of the data to its biokinetics; *Health Phys.* **62 (6):562-566;**

Eckerman K.F., Keer G.D.1999 , Y – 12 Uranium Exposure Study, Life Sciences Division, Oak Ridge National Laboratory

Hamilton, E.I , Sabbini, E., Van der Venne ,M.T. **1994** – Element reference values in tissues from inhabitants of the European Community. VI. Review of elements in blood, plasma and urine and critical evaluation of reference values for the United Kingdom population. *The Science of the Total Environmental* **158, 165-190**

Hiller, G. K.; K. Owen Ash; Costa R., Howerton K. , **2000** – Comparison of representative ranges based on U.S. patient population and literature reference intervals for urinary trace elements. *Clinica Chimica Acta* **296** , 71-98 .

Hodgson,A. Application of the ICRP HRTM to Uranium compounds produced during the manufacture of nuclear fuel. National Radiological Protection Board (NRPB), Radiological Protection Bulletin no. 229, março 2001

Indústrias Nucleares Brasileira (INB). www.inb.gov.br (acessado no início de 2004)

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY; 1999. IAEA Safety Standards Series, Assessment of Occupational Exposure Due to Intakes of Radionuclide, Safety Guide RS-G-1.2

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP). **Report of the Task Group on Reference Man (Publication 23)**, Oxford: Pergamon Press, 1975.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP). **Limits for intakes of radionuclides by workers (Publication 30)**, Part 1, Annals of the ICRP 2 (3-4) Oxford: Pergamon Press, 1979.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP). **Human Respiratory tract model for radiological protection (Publication 66)**. Oxford: Pergamon Press, 1994.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP). **Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 2 Ingestion doses coefficients. (Publication 67)**. Oxford: Pergamon Press, 1994.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP). **Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers (Publication 68)**. Oxford: Pergamon Press, 1995.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP).). **Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides (Publication 69): Part 3 Ingestion doses coefficients**. Oxford: Pergamon Press, 1994b.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP). **Age dependent doses to members of the public from intake of radionuclides (Publication 71) Part 4: Inhalation dose coefficients**. Oxford: Pergamon Press, 1996

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP). **Individual Monitoring for internal exposure of workers. (Publication 78)**. Oxford: Pergamon Press, 1999

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP). Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values (Publication 89) Oxford: Pergamon Press, 2003

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP). **ICRP Guide for Practical Application of the ICRP Human Respiratory Tract Model , Supporting Guidance 3** Oxford: Pergamon Press, 2003.

Julião, L.M.Q.C, Sousa,W.O, Santos, M.S., Fernandes, P.C.P., 2003, Determination of ^{238}U , ^{234}U , ^{232}Th , ^{228}Th , ^{228}Ra , ^{226}Ra and ^{210}Pb concentration in excreta samples of inhabitants of a high natural background area. Radiation Protection Dosimetry, 105, nos. 1-4, pp 379-382.

Karpas, Z, Halicz, L., Roiz, J., MarkoR. Katorza, E. Lorber, A., Golbart, Z. 1996, Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry as a Simple, Rapid, and Inexpensive Method for Determination of Uranium in Urine and Fresh Water: Comparison with LIF. *Health Physics*. 71(6):879-885

Karpas, Z., 2001, Uranium Bioassay – Beyond Urinalysis. *Health Phys.* 81 (4), pp 460 - 463

Karpas, Z., Paz – Tal O., Lorber, A., Salomen, L., komulainen, H., Auvinen, A., Sasha, H., e Kurttio, P. , 2005, Urina, Hair and Nails as indicators for ingestión of uranium in drinking water. *Health Phys.* 88 (3), pp 229 - 242

Li, W. B., Roth, P., Wahl W., Oeh U., Höllriegl V. and Herwig, Paretzke, H.G. **2005** Biokinetic modeling of uranium in man after injection and ingestion, *Radiation Environmental Biophysics.* , **44 (1): 29-40**;

Lourenço, M.C. Análise Paramétrica de Modelos Biocinéticos Utilizados em Dosimetria Interna, Tese (Doutorado Ciências), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1997

Medley, D. W.; Kathren, R. L.; Miller, A. G. **1994** - Diurnal Urinary Volume and Uranium Output in Uranium Workers and Unexposed Controls. *Health Physics.* **67(2):122-130**

NCEH, 2003 - Second National Report on Human Exposere to Environmental Chemicals (2003). Department of Health and Human Services . Centers for Disease Control and Prevention. *National Center for Environmental Health. Division of Laboratory Sciences. Atlanta, Georgia. NCEH Pub. No. 02-0716*

Plöger, E.& Vietzke, H., 1983, "Uranium and Uranium compounds In : Ullmanns Encyclopedic der Technischen Chemie, 4 th edn, v. 23, p. 457-490. Verlag Chemie, Weinheim – Deerfield Beach, Florida

Roth, P., Werner, E., Paretzke, H.G. , **2001** – A Study of Uranium Excreted in urine, An assessment of protective measures taken by the German Army KFOR Contingent, , GSF – National Research Center for Environment and Health, Institute of Radiation, January 2001, GSF Report 3/01

Roth, P., Höllriegel, V., Werner, E. e Schramel, P., 2003. Assessment of Exposed to Depleted Uranium. Radiation Protection Dosimetry. 105(1-4), pp 157-161

Sachet, I.A., Nobrega, A.W. e Lauria, D.C. 1984, Determination of uranium isotopes by chemical stripping and spectrometry. Health Physics 46, pp133-139

SAFETY SERIES REPORT – Indirect Methods for Measurements for Measuring Radionuclides in Human Body – International Atomic Agency, 1998

Santos, L.R. 1986 Unidade Piloto da Obtenção do Tricarbonato de Amônio e Urânio, Lauro Roberto dos Santos, Instituto de Pesquisas Energéticas Nucleares, Universidade de São Paulo, Tese, Mestrado

Santos, M.S., Julião, L.M.Q.C., Azeredo, A.M.G., Fernandes, P.C.P., Melo, D.R. e Godoy, M.L. , 2001 Determination de U, Th e Nb por ICP-MS em amostras biológicas de um grupo não ocupacionalmente exposto. V Regional Congress on Radiation Protection and Safety. April / 29-May/04

Santos, E.E., Lauria, D.C., Amaral, E.C.S. , Rochedo, E.R. **2002** - Daily ingestion of ^{232}Th , ^{238}U , ^{226}Ra , ^{228}Ra and ^{210}Pb in vegetables by inhabitants of Rio de Janeiro city . *J. Environ Radioact* 2002 , 62(1): 75-86)

Scapolant, S., Ansoborlo, E., Moulin, C., e Madic, C., 1998, Uranium(VI) – Transferrin system studied by time – resolved laser – induced fluorescence. *Radiation Protection Dosimetry, Vol 79, No. 1-4, pp. 505-508.*

Schmitzer, C., Brand ,A., Wahl, W., Roth, P., Franck D., Carlan L. and Andradi, A. 2003 – Developments in Internal Monitoring Techniques. *Radiation Protection Dosimetry, Vol 105, No. 1-4, pp. 451-456*

Snipes, M.B. Biokinetics of inhaled radionuclides. 1994 In: RAABE, O.G. (Ed.) **Internal Radiation Dosimetry**. Madison, WI: Medical Physics Publishing,. p.181-196.

Sousa W. O. 2005 Estimativa do Impacto de Fontes Naturais de Radiação em Trabalhadores de duas Instalações não nucleares e nos habitantes das proximidades. Tese de Doutorado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

Stater, J.W. 2004 The development of protection standards for intakes of radionuclides (1955-2005). **Radiation Protection Dosimetry, 109, no. 4, pp. 383 – 397**

Stradling, N., Hodgson, A., Ansoborlo, E., Bérard, P., Etherington, G., Fell, T., Rance, E. and Guen, B.L. 2002 Industrial Uranium Compounds: Exposure Limits, Assessment of Intake and Toxicity after Inhalation – NRPB W 22 (National Radiological Protection Board)

Thing , B.G., Paschal, D.C., Jarrett, J.M., Pirkle, J.L., Jackson, R.J., Sampson, E.J., Miller, D.T. and Caudill, S.P. 1999 , Uranium and Thorium in Urine of United States Residents: Reference Range Concentrations. **Environmental Research Section A 81, 45-51**

Welford, G.A and Baird, R. 1967 Uranium Levels in Human Diet and Biological Material. *Health Phys, 13: 1321 – 1324.*

WHO, 2001- Depleted uranium : Sources, Exposure and Health Effects. Department of Protection of the Human Environment. *World Health Organization* , Geneva, April 2001.
World Health Organization 2001

Werner, E., Oeh,U., Höllriegl V., Roth, P., Regulla, D., 2003, Monitoring of workers and members of the general public for the incorporation of thorium and uranium in the EU and selected countries outside the EU. GSF – Report 09/03. GSF – National Research Center for Environment and Health, Neuherberg.

UNSCEAR (2000) – The United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation . Unscear 2000 Report to the general Assembly Volume 1 – Sources and Effects of Ionizing Radiation

Zeev, K.; Ludwik, H.; Jacob, R.; Rachel, M.; Esther K.; Avraham, L.; Zvi G. **1996**
Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry as a Simple, Rapid, and Inexpensive Method for Determination of Uranium in Urine and Fresh Water: Comparison with LIF.
Health Physics. 71(6):879-885

Xavier 2005 Interpretação de resultados de monitoração individual interna de trabalhadores da Fábrica de Combustível Nuclear - FCN. Tese de Mestrado, Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD/CNEN), Rio de Janeiro , Brasil

ANEXO A – UNIDADE 1

A.1 - Caso2 Avaliação da exposição do trabalhador 191

a) Descrição do caso

Período da fabricação e montagem do elemento combustível do Elemento Combustível: 04/01/2002 a 15/05/2002 (131 dias).

Data de coleta: 20/04/02 – Equivale a 106 dias após o início do período de exposição contínua.

Para o segundo trabalhador as atividades de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e razão urina: fezes experimental estão apresentadas na Tabela A1.1 .

Tabela A.1.1– Atividades de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e razão urina: fezes experimental do trabalhador191, amostras coletadas em 20/04/02

Código do trabalhador	Dias após o início da operação ^a	^{234}U		
		Fezes mBq/dia	Urina mBq/dia	Urina: Fezes Líquida ^b
191	106	7,2	0,6	$8,6 \times 10^{-2}$

^a data da coleta das amostras de excreta em dias após o início do período da montagem do elemento combustível

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes

b) Hipóteses Testadas: A amostra foi coletada 106 dias após o início da produção

Hipótese 1: Crônica por inalação e ingestão durante o período de montagem do elemento combustível

Esta hipótese considera que o trabalhador esteve exposto durante 105 dias a um composto de UO_2 , sendo a inalação a principal via de incorporação e os diâmetros aerodinâmicos medianos das partículas inaladas $1\mu\text{m}$ (DAMA).

As razões urina: fezes teóricas esperadas para diferentes tipos de parâmetros de absorção do modelo pulmonar descrito na publicação 66 do ICRP (1994) estão apresentadas na Tabela A.1.2 .Observa-se que a razão experimental, calculada em relação ao ^{234}U , está na mesma ordem de grandeza que a simulação de incorporação de UO_2 (ICRP 2003), indicando que poderia ter ocorrido exposição crônica via inalação. Por outro lado, este aumento da razão urina: fezes, em relação aos demais casos, ocorre porque a concentração de urânio nas fezes

é equivalente à exposição ambiental. Observa-se ainda que a concentração diária de ^{234}U na urina é 0,62 mBq. Este valor está na mesma ordem de grandeza que a concentração encontrada na urina do restante dos trabalhadores da Unidade 1 que fazem parte do grupo 2.

Tabela A.1.2 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 105 dias de compostos Tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão e coleta no dia seguinte.

Tipo de Simulação	Urina	Fezes	Razão
<i>Tipo F</i>	$9,8 \times 10^{-02}$	$9,5 \times 10^{-02}$	$1,0 \times 10^{+00}$
<i>Tipo M</i>	$4,2 \times 10^{-02}$	$2,3 \times 10^{-01}$	$1,9 \times 10^{-01}$
<i>Tipo S</i>	$1,2 \times 10^{-03}$	$2,5 \times 10^{-01}$	$5,0 \times 10^{-03}$
<i>ICRP 2003^a</i>	$1,7 \times 10^{-02}$	$2,4 \times 10^{-01}$	$7,0 \times 10^{-02}$
<i>UO₂ (UK)^b</i>	$6,1 \times 10^{-03}$	$2,5 \times 10^{-01}$	$2,4 \times 10^{-02}$
<i>UO₂(F)^c</i>	$8,8 \times 10^{-03}$	$2,5 \times 10^{-01}$	$3,5 \times 10^{-02}$
<i>UO₂(UK2)^b</i>	$3,3 \times 10^{-03}$	$2,5 \times 10^{-01}$	$1,3 \times 10^{-02}$
<i>Ingestão composto insolúvel</i>	$1,1 \times 10^{-03}$	$9,0 \times 10^{-01}$	$1,2 \times 10^{-03}$

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003).

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansorbolo e col., 2002.

➤ Simulação de Incorporação por inalação crônica de um composto Tipo S

Testando-se a possibilidade de ter ocorrido inalação de um composto tipo S, fez-se a seguinte suposição: sabendo que a atividade incorporada é calculada pela equação:

$$I = \frac{M}{m(t)} (\text{Bq})$$

onde, M é o resultado da medida e m(t) é a fração da incorporação de 1Bq esperada, aplicando um modelo teórico. Utilizando o dado de excreção urinária de 0,62 mBq/dia, calcula-se um valor de incorporação diária de 0,50 Bq. Partindo deste valor de incorporação, espera-se encontrar nas fezes uma atividade diária equivalente 125 mBq .

Este valor é maior que o valor experimental encontrado 9 mBq, logo, é provável que não tenha ocorrido inalação crônica de um composto Tipo S.

Hipótese 2: Exposição de curta duração, via inalação, com incorporação substancialmente superior a incorporação crônica diária do trabalhador durante os 106 dias

Esta hipótese considera que o trabalhador sofreu uma incorporação por inalação de duração limitada de compostos com o DAMA de 1 µm. As frações da incorporação teoricamente esperadas nas amostras de 24 horas de urina, fezes e a razão urina : fezes, estão apresentadas na Tabela A1.3 para amostras coletadas 1 a 5 dias após a exposição.

Tabela A.1.3 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando-se incorporação de curta duração e coleta de fezes e urina até 5 dias após exposição

Incorporação	Urina/fezes (1º dia)	Urina/fezes (2º dia)	Urina/fezes (3º dia)	Urina/fezes (5º dia)
<i>Inalação Tipo M</i>	3,3x10 ⁻⁰¹	1,3x10 ⁻²	2,0 x 10 ⁻²	1,0x10 ⁻²
<i>Inalação Tipo S</i>	7,2x10 ⁻⁰³	3,9x10 ⁻⁴	4,9x10 ⁻⁴	2,3x10 ⁻³
<i>UO₂ ICRP 2003^a</i>	7,5 x10 ⁻⁰²	1,1x10 ⁻²	1,0x10 ⁻²	3,3x10 ⁻²
<i>UO₂ (UK)^b</i>	1,3x10 ⁻⁰²	3,4x10 ⁻³	3,5x10 ⁻³	1,1x10 ⁻²
<i>UO₂(F)^c</i>	2,3x10 ⁻⁰²	5,9x10 ⁻³	4,9x10 ⁻³	1,5x10 ⁻²
<i>UO₂(UK₂)^b</i>	1,4x10 ⁻⁰²	2,9x10 ⁻³	2,3x10 ⁻³	6,3x10 ⁻³
<i>Ingestão composto insolúvel</i>	4,5x10 ⁻⁰³	1,8x10 ⁻⁴	1,9x10 ⁻⁴	9,6x10 ⁻⁴

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003).

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansbolo e col., 2002.

Ao comparar as razões teóricas com a razão experimental observa-se que ela está na mesma ordem da razão teórica da simulação de incorporação de UO₂(ICRP 2003). Os dados indicam que as amostras de fezes e urina foram provavelmente coletadas 1 dia após a incorporação de UO₂.

A.2 - Caso 3 Avaliação da exposição do trabalhador 183

a) Descrição do caso

Período da fabricação e montagem do elemento combustível. do Elemento Combustível: 04/01/2002 a 15/05/2002 (131 dias).

Data de coleta: 13/05/02 – Equivale a 132 dias após o início do período de exposição contínua

Para o terceiro trabalhador as atividades de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental estão apresentadas na Tabela A.2. 1.

Tabela A.2.1– Atividades de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e razão urina: fezes experimental do trabalhador 183 coletadas em 13/05/02

Código do trabalhador	Dias após o início da operação ^a	^{234}U		
		Fezes mBq/dia	Urina mBq/dia	Urina: Fezes Líquida ^b
183	132	83,1	0,7	$8,4 \times 10^{-03}$

^a data da coleta das amostras de excreta em dias após o início do período da montagem do elemento combustível

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes

b) Hipóteses Testadas: A amostra foi coletada 106 dias após o início da produção

Hipótese 1: Crônica por inalação e ingestão durante o período de montagem do elemento combustível

Esta hipótese considera que o trabalhador esteve exposto durante 105 dias a um composto de UO_2 , sendo a inalação a principal via de incorporação e os diâmetros aerodinâmicos medianos das partículas inaladas $1\mu\text{m}$ (DAMA).

As razões urina: fezes teóricas esperadas para diferentes tipos de parâmetros de absorção do modelo pulmonar descrito na publicação 66 do ICRP (1994), estão apresentadas na Tabela A.2.2.

Observa-se que as razões teóricas estão na mesma ordem de grandeza da razão experimental calculada em relação ao ^{234}U , indicando que ocorreu exposição crônica via inalação ou ingestão.

Como mostram as Tabelas A.2.1 e A.2.2, os valores das razões teóricas e experimental estão próximos. Estes resultados indicam que pode ter ocorrido exposição crônica via inalação de um composto de urânio de um composto de urânio insolúvel Tipo S. Esse resultado está de acordo com os parâmetros adotados pela ICRP quando considera uma incorporação por inalação de um composto do tipo S.

Tabela A.2.2 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 131 dias de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão e coleta no dia seguinte.

Tipo de Simulação	Urina	Fezes	Razão
<i>Tipo F</i>	$9,9 \times 10^{-02}$	$9,5 \times 10^{-02}$	$1,0 \times 10^{+00}$
<i>Tipo M</i>	$4,7 \times 10^{-02}$	$2,3 \times 10^{-01}$	$2,1 \times 10^{-01}$
<i>Tipo S</i>	$1,4 \times 10^{-03}$	$2,6 \times 10^{-01}$	$5,6 \times 10^{-03}$
<i>ICRP 2003^a</i>	$1,9 \times 10^{-02}$	$2,5 \times 10^{-01}$	$7,9 \times 10^{-02}$
<i>$\text{UO}_2(\text{UK})^b$</i>	$7,1 \times 10^{-03}$	$2,5 \times 10^{-01}$	$2,8 \times 10^{-02}$
<i>$\text{UO}_2(\text{F})^c$</i>	$1,0 \times 10^{-02}$	$2,5 \times 10^{-01}$	$4,0 \times 10^{-02}$
<i>$\text{UO}_2(\text{UK}_2)^b$</i>	$3,8 \times 10^{-03}$	$2,5 \times 10^{-01}$	$1,5 \times 10^{-02}$
<i>Ingestão composto insolúvel</i>	$1,1 \times 10^{-03}$	$9,0 \times 10^{-01}$	$1,2 \times 10^{-03}$

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003).

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansbolo e col., 2002.

Hipótese 2: Exposição de curta duração, via inalação, com incorporação substancialmente superior a incorporação crônica diária do trabalhador durante os 132 dias.

Para este cenário simulou-se a incorporação única de UO_2 , considerando as diferentes solubilidades. Comparando-se as razões urina: fezes experimental com as razões derivadas a partir dos modelos teóricos simulando uma incorporação única por inalação de um

composto Tipo S, observa-se que a razão urina:fezes experimental está na mesma ordem de grandeza da razão teórica, sugerindo que poderia ter ocorrido uma exposição recente, tanto por inalação de um composto do Tipo S, no dia anterior ao dia da coleta da amostra, como também por ingestão. No entanto, como observado na coluna 3 e 4 da Tabela A.2.3, a razão urina:fezes experimental está muito próxima da razão teórica para inalação de $UO_2(UK)$ ou $UO_2(UK_2)$ quando assume-se que a coleta da excreção urinária e fecal foi realizada até 5 dias após a incorporação.

Tabela A.2.3 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando-se incorporação de curta duração e coleta de fezes e urina até 5 dias após exposição.

Incorporação	Urina/fezes (1º dia)	Urina/fezes (2º dia)	Urina/fezes (3º dia)	Urina/fezes (5º dia)
<i>Tipo M</i>	$3,3 \times 10^{-01}$	$1,3 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$
<i>Tipo S</i>	$7,2 \times 10^{-03}$	$3,9 \times 10^{-4}$	$4,9 \times 10^{-4}$	$2,3 \times 10^{-3}$
<i>UO_2 ICRP 2003^a</i>	$7,5 \times 10^{-02}$	$1,1 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$3,3 \times 10^{-2}$
<i>$UO_2(UK)^b$</i>	$1,3 \times 10^{-02}$	$3,4 \times 10^{-3}$	$3,5 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-2}$
<i>$UO_2(F)^c$</i>	$2,3 \times 10^{-02}$	$5,9 \times 10^{-3}$	$4,9 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-2}$
<i>$UO_2(UK_2)^b$</i>	$1,4 \times 10^{-02}$	$2,9 \times 10^{-3}$	$2,3 \times 10^{-3}$	$6,3 \times 10^{-3}$
<i>Ingestão composto insolúvel</i>	$4,5 \times 10^{-03}$	$1,8 \times 10^{-4}$	$1,9 \times 10^{-4}$	$9,6 \times 10^{-4}$

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003).

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansbol e col., 2002.

A .3 - Caso 4 Avaliação da exposição do trabalhador 186

a) Descrição do caso:

Período da fabricação e montagem do elemento combustível. do Elemento

Combustível: 04/01/2002 a 15/05/2002 (131 dias).

Data de coleta: 13/05/02 – Equivale a 132 dias após o início do período de exposição contínua.

Para o terceiro trabalhador as atividades de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental estão apresentadas na Tabela A.3. 1.

Tabela A.3.1 – Atividades de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e razão urina: fezes experimental do trabalhador 186, amostras coletadas em 13/05/02

Código do trabalhador	Dias após o início da operação ^a	^{234}U		
		Fezes mBq/dia	Urina mBq/dia	Urina: Fezes Líquida ^b
186	132	56	0,3	$5,7 \times 10^{-03}$

^a data da coleta das amostras de excreta em dias após o início do período da montagem do elemento combustível

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes

b) Hipóteses Testadas: A amostra foi coletada 132 dias após o início da produção

Hipótese 1: Crônica por inalação e ingestão durante o período de montagem do elemento combustível

Esta hipótese considera que o trabalhador esteve exposto durante 131 dias a um composto de UO_2 , como nos outros casos, a inalação é considerada a principal via de incorporação. A simulação foi feita considerando-se uma incorporação contínua durante 131 dias de trabalho. Considera-se que as amostras de fezes e urina foram coletadas 132 dias após o início daquela operação da Unidade 1. As razões urina: fezes teóricas para os diferentes tipos de “solubilidade estão apresentadas na Tabela A .2.2.

Comparando-se as razões urina:fezes experimental com as razões teóricas observa-se que estão na mesma ordem de grandeza. Estes resultados indicam que pode ter ocorrido exposição crônica via inalação de um composto de urânio insolúvel Tipo S.

Hipótese 2: Exposição de curta duração, via inalação, com incorporação substancialmente superior a incorporação crônica diária do trabalhador durante os 132 dias. Simulou-se a incorporação única de UO_2 , considerando as diferentes solubilidades. Comparando-se as razões urina:fezes experimental com as razões derivadas a partir dos modelos teóricos simulando uma incorporação única por inalação observa-se que a razão urina:fezes experimental está na mesma ordem de grandeza da razão teórica, indicando que poderia ter ocorrido uma exposição recente, tanto por inalação de um composto do Tipo S, no dia anterior ao dia da coleta da amostra, como também por ingestão. Como no caso anterior, a razão urina:fezes experimental está muito próxima da razão teórica para inalação de composto, quando simulou-se a incorporação de um composto com os parâmetros de retenção pulmonar descrito na literatura como tendo “solubilidade” Tipo UK ou F, com coleta realizada 2 ou 3 dias após a incorporação, como mostra a Tabela A.2.3. O composto poderia ainda ter sido caracterizado como tendo “solubilidade” Tipo UK_2 , com coleta realizada 5 dias após a incorporação

A .4 - Caso 5 Avaliação da exposição do trabalhador 210

a) Descrição do caso:

Período da fabricação e montagem do elemento combustível do Elemento Combustível: 04/01/2002 a 15/05/2002 (131 dias).

Data de coleta: 13/05/02 – Equivale a 132 dias após o início do período de exposição contínua.

Para o quarto trabalhador a atividade de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental estão apresentadas na Tabela A.4. 1.

Tabela A.4.1 – Atividades de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 210, amostras coletadas em 13/05/02

Código do trabalhador	Dias após o início da operação ^a	^{234}U		
		Fezes mBq/dia	Urina mBq/dia	Urina: Fezes Líquida ^b
210	132	12,7	2,7	$2,1 \times 10^{01}$

^a data da coleta das amostras de excreta em dias após o início do período da montagem do elemento combustível

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes

b) Hipóteses Testadas: A amostra foi coletada 132 dias após o início da produção

Hipótese 1: Crônica por inalação e ingestão durante o período de montagem do elemento combustível

Esta hipótese considera que o trabalhador esteve exposto durante 131 dias a um composto de UO_2 , sendo a inalação a principal via de incorporação e os diâmetros aerodinâmicos medianos das partículas inaladas $1\mu\text{m}$ (DAMA).

As razões urina: fezes teóricas esperadas para diferentes tipos de parâmetros de absorção do modelo pulmonar descrito na publicação 66 do ICRP (1994), estão apresentadas na Tabela A.2.2. Observa-se que as razões teóricas estão na mesma ordem de grandeza da razão experimental calculada em relação ao ^{234}U , indicando a possibilidade de exposição crônica via inalação de um composto tipo M.

➤ **Simulação de Incorporação por inalação crônica de um composto Tipo S**

Testando-se a possibilidade de ter ocorrido inalação de um composto tipo S, fez-se a seguinte suposição: sabendo que a atividade incorporada é calculada pela equação:

$$I = \frac{M}{m(t)}(Bq)$$

onde, M é o resultado da medida e m(t) é a fração da incorporação de 1Bq esperada, aplicando um modelo teórico. Utilizando o dado de excreção urinária de 2,73 mBq/dia, calcula-se um valor de incorporação diária de 1,9 Bq. Partindo deste valor de incorporação, espera-se encontrar nas fezes uma atividade diária equivalente 485 mBq. Este valor é

maior que o valor experimental encontrado 12 mBq, logo, é provável que não tenha ocorrido inalação crônica de um composto Tipo S.

Hipótese 2: Exposição de curta duração, via inalação, com incorporação substancialmente superior a incorporação crônica diária do trabalhador durante os 132 dias.

Simulou-se a incorporação única de UO_2 , considerando as diferentes solubilidades. Comparando-se as razões urina:fezes experimental com as razões derivadas a partir dos modelos teóricos simulando uma incorporação única por inalação, apresentada na Tabela A.2.3, observa-se que a razão urina:fezes experimental ($2,1 \times 10^{-1}$) está na mesma ordem de grandeza da razão teórica ($3,3 \times 10^{-1}$), indicando que pode ter ocorrido uma exposição de curta duração, via inalação de um composto do Tipo M, com coleta de amostras um dia após a exposição.

ANEXO B – UNIDADE 2

B.1 – Caso3 Avaliação do Trabalhador 232 em 2002

a) Descrição do caso

Período de Exposição: 68 dias

Data de coleta: 03/05/02 - Equivale a 104 dias após o início da exposição crônica de 68 dias, ou coleta da amostra 36 dias após o término da exposição.

Para esse trabalhador as atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e a razão urina: fezes experimental estão apresentadas na Tabela B.1.1.

Tabela B.1.1– Atividades ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 232, amostras coletadas em 03/05/02.

Código do trabalhador	Função	Dias após o início da operação ^a	^{238}U		
			Fezes mBq/dia	Urina mBq/dia	Urina: Fezes Líquida ^b
232	<i>prensa</i>	104	0,6	0,14	$2,4 \times 10^{-01}$

^a data da coleta das amostras de excreta

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes

b) Hipóteses Testadas: A amostra foi coletada 104 dias após o início da operação

Hipótese 1: Exposição Crônica via inalação seguido de um período sem exposição com a fábrica parada:

Esta hipótese considera que o trabalhador esteve exposto cronicamente durante 68 dias a um composto de UO_2 , a inalação como principal via de incorporação e os diâmetros aerodinâmicos medianos das partículas inalada 1 μm . Considera-se que as amostras de fezes e urina foram coletadas 104 dias após o início da exposição. As razões urina: fezes teóricas para diferentes tipos de “solubilidade” estão na Tabela B.12.

As razões experimentais do trabalhador 232 são diferentes do restante do grupo. Como pode ser visto nas Tabelas B.1.2 , simulando-se a incorporação de compostos com

diferentes solubilidades e comparando a razão experimental e teórica, observa-se que a razão experimental está na mesma ordem de grandeza que a simulação de incorporação de um composto com os parâmetros de retenção pulmonar Tipo $UO_2(F)$.

Tabela B.1.2: Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 68 dias de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão, considerando a coleta a amostra 104 dias após o início da exposição

Tipo de Simulação	urina	fezes	Razão U:F
<i>Tipo F</i>	$1,2 \times 10^{-02}$	$7,4 \times 10^{-05}$	$1,7 \times 10^{+02}$
<i>Tipo M</i>	$1,9 \times 10^{-02}$	$1,4 \times 10^{-02}$	$1,4 \times 10^{+00}$
<i>Tipo S</i>	$5,9 \times 10^{-04}$	$2,1 \times 10^{-02}$	$2,8 \times 10^{-02}$
<i>ICRP 2003^a</i>	$7,6 \times 10^{-03}$	$1,8 \times 10^{-02}$	$4,2 \times 10^{-01}$
<i>$UO_2(UK)^b$</i>	$3,1 \times 10^{-03}$	$2,0 \times 10^{-02}$	$1,6 \times 10^{-01}$
<i>$UO_2(F)^c$</i>	$4,3 \times 10^{-03}$	$1,9 \times 10^{-02}$	$2,2 \times 10^{-01}$
<i>$UO_2(UK_2)^b$</i>	$1,4 \times 10^{-03}$	$2,0 \times 10^{-02}$	$7,1 \times 10^{-02}$
<i>Ingestão</i>	$1,0 \times 10^{-04}$	$6,1 \times 10^{-07}$	$1,7 \times 10^{+02}$

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003).

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansbolo e col., 2002.

Este aumento da razão urina:fezes, em relação aos demais casos, ocorre porque a concentração de urânio nas fezes é equivalente à exposição ambiental. Após o desconto da contribuição ambiental, o valor de concentração de urânio na amostra de fezes é de 0,6 mBq/dia, indicando não ter contribuição de exposição ocupacional, como apresentado na Tabela B.1.2.

Observa-se ainda que a concentração diária de ^{238}U na urina é 0,14 mBq. Este valor está na mesma ordem de grandeza que a concentração encontrada na urina dos trabalhadores da Unidade 1, que incorporaram composto classificado como Tipo S.

a) Simulação de Incorporação por inalação crônica de um composto Tipo S

Testando-se a possibilidade de ter ocorrido inalação de um composto tipo S, fez-se a seguinte suposição: sabendo que a atividade incorporada é calculada pela equação:

$$I = \frac{M}{m(t)} (Bq)$$

onde, M é o resultado da medida e m(t) é a fração da incorporação de 1Bq esperada, aplicando um modelo teórico. Utilizando o dado de excreção urinária de 0,14 mBq/dia, calcula-se um valor de incorporação diária de 0,24 Bq. Partindo deste valor de incorporação, espera-se encontrar nas fezes uma atividade diária equivalente 4,8 mBq. Este valor é bastante próximo do valor experimental encontrado 9,9 mBq, logo, é provável que tenha ocorrido inalação crônica de um composto Tipo S.

b) Simulação de Incorporação por inalação crônica de compostos Tipo UO₂(UK), UO₂(F) e UO₂(UK₂)

Testando-se a possibilidade de ter ocorrido inalação desses compostos, fez-se a seguinte suposição: sabendo que a atividade incorporada é calculada pela equação:

$$I = \frac{M}{m(t)} (Bq)$$

onde, M é o resultado da medida e m(t) é a fração da incorporação de 1Bq esperada, aplicando um modelo teórico. Utilizando o dado de excreção urinária de 0,14 mBq/dia, calcula-se um valor de incorporação diária de 22,8, 15,8 e 41,8 mBq, respectivamente para as simulações denominadas UO₂ (UK), UO₂ (F) e UO₂ (UK₂) . Partindo de cada valor de incorporação, espera-se encontrar nas fezes uma atividade diária equivalente 5,7, 3,9 e 10,4 mBq respectivamente para as simulações denominadas UO₂ (UK), UO₂ (F) e UO₂ (UK₂) . Estes valores estão próximos do valor experimental e da contribuição ambiental.

Hipótese 2: Exposição crônica, apesar das atividades de produção de pastilha estarem concluídas.

Neste caso, o trabalhador poderia estar realizando outras atividades rotineiras dentro da fábrica, com exposição ocupacional ao urânio. Comparando-se a razão experimental com

as teóricas, observa-se na Tabela B.1.3 que a razão experimental se aproxima da razão teórica supondo-se inalação de um composto do Tipo M.

Tabela B.1.3- Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 103 dias de compostos tipo F, M, S e UO₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando que as amostras foram coletadas 104 dias após o início da exposição

Tipo de Simulação	urina	fezes	razão
<i>Tipo F</i>	9,8X10 ⁻⁰²	9,5X10 ⁻⁰²	1,0X10 ⁺⁰⁰
<i>Tipo M</i>	4,2X10 ⁻⁰²	2,3X10 ⁻⁰¹	1,9X10 ⁻⁰¹
<i>Tipo S</i>	1,2X10 ⁻⁰³	2,5X10 ⁻⁰¹	4,9X10 ⁻⁰³
<i>ICRP 2003^a</i>	1,7X10 ⁻⁰²	2,4X10 ⁻⁰¹	7,0X10 ⁻⁰²
<i>UO₂ (UK)^b</i>	6,0X10 ⁻⁰³	2,5X10 ⁻⁰¹	2,4X10 ⁻⁰²
<i>UO₂(F)^c</i>	8,7X10 ⁻⁰³	2,5X10 ⁻⁰¹	3,5X10 ⁻⁰²
<i>UO₂(UK₂)^b</i>	3,3X10 ⁻⁰³	2,5X10 ⁻⁰¹	1,3X10 ⁻⁰²
<i>Ingestão composto insolúvel</i>	1,8X10 ⁻⁰³	1,0X10 ⁰⁰	1,8X10 ⁻⁰³

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003).

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansbololo e col., 2002.

➤ **Simulação de Incorporação por inalação crônica de um composto Tipo M**

Testando-se a possibilidade de ter ocorrido inalação de um composto tipo M, fez-se a seguinte suposição: sabendo que a atividade incorporada é calculada pela equação:

$$I = \frac{M}{m(t)} (Bq)$$

onde, M é o resultado da medida e m(t) é a fração da incorporação de 1Bq esperada, aplicando um modelo teórico. Utilizando o dado de excreção urinária de 0,138 mBq/dia, calcula-se um valor de incorporação diária de 3,2 mBq. Partindo deste valor de incorporação, espera-se encontrar nas fezes uma atividade diária equivalente 0,74 mBq.

Este valor é bastante próximo do valor experimental. Indica que pode ter ocorrido inalação crônica de um composto Tipo M.

Hipótese 3: Exposição de curta duração, via inalação, com incorporação substancialmente superior à incorporação crônica diária que o trabalhador poderia ter durante os 67 dias

Através das frações teóricas apresentadas na Tabela B.1.4 calculou-se a atividade incorporada utilizando o dado de excreção urinária de 0,138 mBq/dia, calcula-se um valor de incorporação diária de 7,4 mBq. Partindo deste valor de incorporação, espera-se encontrar nas fezes uma atividade diária equivalente 0,4 mBq. Este valor é bastante próximo do valor experimental. Indica que pode ter ocorrido inalação eventual de um composto Tipo M.

Tabela B.1.4 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando-se incorporação de curta duração e coleta de fezes e urina 1 dia após exposição recente

Incorporação	urina	fezes	Urina/fezes
<i>Tipo M</i>	1,8X10 ⁻⁰²	5,7 X10 ⁻⁰²	3,2X10 ⁻⁰¹
<i>Tipo S</i>	4,4X10 ⁻⁰⁴	6,1X10 ⁻⁰²	7,2X10 ⁻⁰³
<i>UO₂ICRP 2003^a</i>	4,5 X10 ⁻⁰³	6,0 X10 ⁻⁰²	7,5 X10 ⁻⁰²
<i>UO₂(UK)^b</i>	7,7 X10 ⁻⁰⁴	6,1X10 ⁻⁰²	1,3X10 ⁻⁰²
<i>UO₂(F)^c</i>	1,4X10 ⁻⁰³	6,1X10 ⁻⁰²	2,3X10 ⁻⁰²
<i>UO₂(UK₂)^b</i>	8,4X10 ⁻⁰⁴	6,1X10 ⁻⁰²	1,4X10 ⁻⁰²
<i>Ingestão composto insolúvel</i>	1,3X10 ⁻⁰³	2,8X10 ⁻⁰¹	4,5X10 ⁻⁰³

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003).

^b Stradling e col., 2002.

^c Anorbolo e col., 2002

Este aumento da razão urina:fezes, em relação aos demais casos, ocorre porque a concentração de urânio nas fezes é equivalente à exposição ambiental. É difícil afirmar que tenha ocorrido incorporação de um composto Tipo M ou com UO₂ com diferentes parâmetros, dado que é um trabalhador da prensa. Mas não pode ser descartada a

possibilidade de ter ocorrido uma incorporação eventual em outra área da fábrica, já que nesta ocasião a produção de pastilhas estava encerrada .

Como o valor da excreção fecal de ^{238}U do trabalhador era próxima à contribuição ambiental testou-se as hipóteses considerando a excreção fecal de ^{234}U . A Tabela B.1.5 apresenta a atividade de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e a razão urina:fezes experimental .

Tabela B.1.5 - Atividades de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 232, amostras coletadas em 03/05/02

Código do trabalhador	Função	Dias após o início ^a da operação	^{234}U		
			Fezes mBq/dia	Urina mBq/dia	Urina:Fezes Líquida ^b
232	<i>prensa</i>	104	11	0,31	$2,8 \times 10^{-02}$

^a data da coleta das amostras de excreta

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes

Hipóteses Testadas: A amostra foi coletada 104 dias após o início da operação

Hipótese 1: Exposição Crônica via inalação seguido de um período sem exposição com a fábrica parada

Esta hipótese considera que o trabalhador esteve exposto cronicamente durante 68 dias a um composto de UO_2 , a inalação como principal via de incorporação e os diâmetros aerodinâmicos medianos das partículas inalada $1 \mu\text{m}$. Considera-se que as amostras de fezes e urina foram coletadas 104 dias após o início da exposição. As razões urina:fezes teóricas para diferentes tipos de “solubilidade” estão apresentadas na Tabela B.1.3. A comparação com a razão experimental indica a possibilidade de incorporação de um composto Tipo S.

Hipótese 2: Exposição crônica, apesar das atividades de produção de pastilha estarem concluídas.

Neste caso, o trabalhador poderia estar realizando outras atividades rotineiras dentro da fábrica, com exposição ocupacional ao urânio. Comparando-se a razão experimental com as teóricas (Tabela B.1.3), observa-se que a razão experimental se aproxima da razão teórica supondo-se inalação de um composto Tipo $UO_2(UK)$ ou ainda o $UO_2(F)$

Hipótese 3: Exposição de curta duração, via inalação, com incorporação substancialmente superior à incorporação crônica diária que o trabalhador poderia ter durante os 67 dias

Comparando as razões teóricas apresentadas na Tabela B.1.4 com a razão experimental, verificamos a possibilidade de inalação de um composto Tipo $UO_2(F)$.

B.2 – Caso4: Avaliação do Trabalhador 232 em 2003

a) Descrição do caso

Análise de dados do mesmo trabalhador coletados em 2003

Em dezembro de 2002, a fábrica iniciou uma nova operação com duração de 4 meses aproximadamente. No ano de 2003 foram coletadas amostras de fezes e urina, em 17 de abril de 2003, desse trabalhador e determinou-se a concentração de urânio nessas amostras. Essas análises fazem parte do trabalho realizado por Xavier, onde foram analisadas as concentrações de urânio em amostras de fezes e de urina de diversos trabalhadores da FCN (Xavier, 2005). Este trabalhador esteve exposto durante 127 dias, a coleta das amostras foi realizada no dia seguinte após o término da exposição. Os resultados das concentrações de urânio nas fezes estão apresentados na Tabela B.2.1.

Tabela B.2.1 – Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 232, amostras coletadas em 17/04/03

Código do trabalhador	Função	Dias após o início ^a da operação	^{238}U		
			Fezes mBq/dia	Urina mBq/dia	Urina:Fezes Líquida ^b
232	<i>prensa</i>	127	367,4	0,35	$1,0 \times 10^{-3}$

^a data da coleta das amostras de excreta

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes

b) Hipóteses Testadas:

Hipótese 1: Exposição crônica via inalação e ingestão durante o período de produção

Esta hipótese considera que o trabalhador esteve exposto durante 127 dias a um composto de UO_2 , sendo a inalação a principal via de incorporação e o diâmetro aerodinâmico da partícula inalada de $1\mu\text{m}$. Considerou-se que a coleta foi realizada 128 dias após o início da exposição. As razões urina:fezes teóricas para diferentes os tipos de solubilidade estão na Tabela B.2.2.

Tabela B.2.2 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 127 dias de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando que as amostras foram coletadas 128 dias após o início da exposição

Tipo de Simulação	urina	fezes	Urina:Fezes
<i>Tipo F</i>	$9,9 \times 10^{-02}$	$9,5 \times 10^{-02}$	$1,0 \times 10^{+00}$
<i>Tipo M</i>	$4,7 \times 10^{-02}$	$2,3 \times 10^{-01}$	$2,0 \times 10^{-01}$
<i>Tipo S</i>	$1,4 \times 10^{-03}$	$2,5 \times 10^{-01}$	$5,5 \times 10^{-03}$
<i>ICRP 2003^a</i>	$1,9 \times 10^{-02}$	$2,5 \times 10^{-01}$	$7,8 \times 10^{-02}$
<i>$\text{UO}_2(\text{UK})^b$</i>	$7,0 \times 10^{-03}$	$2,5 \times 10^{-01}$	$2,7 \times 10^{-02}$
<i>$\text{UO}_2(\text{F})^c$</i>	$1,0 \times 10^{-02}$	$2,5 \times 10^{-01}$	$3,9 \times 10^{-02}$
<i>$\text{UO}_2(\text{UK}_2)^b$</i>	$3,7 \times 10^{-03}$	$2,5 \times 10^{-01}$	$1,5 \times 10^{-02}$
<i>Ingestão</i>	$1,1 \times 10^{-03}$	$9,0 \times 10^{-01}$	$1,2 \times 10^{-03}$

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003)

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansbololo e col., 2002.

Comparando-se as razões experimentais e as teóricas, apresentadas nas Tabelas B.21 e B.22, observa-se que a razão teórica é praticamente a mesma que a encontrada para a hipótese de ingestão crônica, indicando que esta poderia ter sido a principal via de incorporação.

Hipótese 2: Exposição de curta duração, via inalação, com incorporação substancialmente superior à incorporação crônica diária que o trabalhador poderia ter durante os 127 dias.

Esta hipótese considera que o trabalhador sofreu uma incorporação por inalação de duração limitada de compostos com o DAMA de $1\mu\text{m}$. As razões urina : fezes estão apresentadas na Tabela B.2.3, para amostras coletadas entre um e cinco dias após a exposição.

Comparando-se o modelo teórico com os dados experimentais verificamos que a razão urina:fezes experimental está na mesma ordem de grandeza da razão teórica esperada para inalação de um composto do tipo S para amostras coletadas 4 ou 5 dias após a incorporação.

Tabela B.2.3 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando-se incorporação de curta duração

Incorporação	Urina/fezes 1º dia	Urina/fezes 2º dia	Urina/fezes 3º dia	Urina/fezes 4º dia	Urina/fezes 5º dia
<i>Tipo M</i>	3,3x10 ⁻⁰¹	1,3x10 ⁻²	2,0 x 10 ⁻²	4,5x10 ⁻⁰²	1,0x10 ⁻²
<i>Tipo S</i>	7,2x10 ⁻⁰³	3,9x10 ⁻⁴	4,9x10 ⁻⁴	1,1x10 ⁻⁰³	2,3x10 ⁻³
<i>UO₂ ICRP 2003^a</i>	7,5 x10 ⁻⁰²	1,1x10 ⁻²	1,0x10 ⁻²	1,6x10 ⁻⁰²	3,3x10 ⁻²
<i>UO₂ (UK)^b</i>	1,3x10 ⁻⁰²	3,4x10 ⁻³	3,5x10 ⁻³	5,5x10 ⁻⁰³	1,1x10 ⁻²
<i>UO₂(F)^c</i>	2,3x10 ⁻⁰²	5,9x10 ⁻³	4,9x10 ⁻³	7,4x10 ⁻⁰³	1,5x10 ⁻²
<i>UO₂(UK₂)^b</i>	1,4x10 ⁻⁰²	2,9x10 ⁻³	2,3x10 ⁻³	3,3x10 ⁻⁰³	6,3x10 ⁻³
<i>Ingestão composto insolúvel</i>	4,5x10 ⁻⁰³	1,8x10 ⁻⁴	1,9x10 ⁻⁴	4,1x10 ⁻⁰⁴	9,6x10 ⁻⁴

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003)

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansbolo e col., 2002.

A Tabela B.2.3 mostra que a razão experimental é compatível com a razão teórica no 3º dia após uma única incorporação, indicando que pode ter ocorrido inalação de um composto Tipo UO₂(UK₂).

B.3 - Caso 5 Avaliação do trabalhador 219 em 2002

a) Descrição do caso:

Período de Exposição: 68 dias

Data de coleta: 01/05/02 - Equivale a 102 dias após o início da exposição crônica de 68 dias, ou coleta da amostra 34 dias após o término da exposição.

Para esse trabalhador a atividade de ²³⁸U nas amostras de urina e fezes e razão urina: fezes experimental estão apresentadas na Tabela B.3.1.

Tabela B.3.1 – Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 219 coletadas em 01/05/02

Código do trabalhador	Função	Dias após o início ^a da operação	^{238}U		
			Fezes mBq/dia	Urina mBq/dia	Urina:Fezes Líquida ^b
219	<i>retífica</i>	102	9,8	0,08	$8,4 \times 10^{-03}$

^a data da coleta das amostras de excreta

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes

b) Hipóteses Testadas:

Hipótese 1: Exposição Crônica via inalação seguido de um período sem exposição com a fábrica parada.

Esta hipótese considera que o trabalhador esteve exposto durante 68 dias a um composto de UO_2 , a inalação como a principal via de incorporação e $1\mu\text{m}$ o diâmetro aerodinâmico da partícula inalada (DAMA). A simulação foi feita considerando-se uma incorporação contínua durante 68 dias de trabalho. Considera-se que as amostras de fezes e urina foram coletadas 102 dias após o início da operação da Unidade 2. As razões urina:fezes teóricas para os diferentes tipos de “solubilidade” estão apresentadas na Tabela B.3.2.

Tabela B.3.2 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 68 dias de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando que as amostras foram coletadas 102 dias após o início da exposição

Tipo de Simulação	urina	fezes	razão
<i>Tipo F</i>	$1,3 \times 10^{-02}$	$7,8 \times 10^{-05}$	$1,7 \times 10^{+02}$
<i>Tipo M</i>	$1,9 \times 10^{-02}$	$1,4 \times 10^{-02}$	$1,3 \times 10^{+00}$
<i>Tipo S</i>	$5,9 \times 10^{-04}$	$2,1 \times 10^{-02}$	$2,8 \times 10^{-02}$
<i>ICRP 2003^a</i>	$7,7 \times 10^{-03}$	$1,9 \times 10^{-02}$	$4,1 \times 10^{-01}$
<i>UO_2 (UK)^b</i>	$3,1 \times 10^{-03}$	$2,1 \times 10^{-02}$	$1,5 \times 10^{-01}$
<i>UO_2(F)^c</i>	$4,3 \times 10^{-03}$	$2,0 \times 10^{-02}$	$2,2 \times 10^{-01}$
<i>UO_2(UK₂)^b</i>	$1,4 \times 10^{-03}$	$2,1 \times 10^{-02}$	$6,9 \times 10^{-02}$
<i>Ingestão</i>	$1,1 \times 10^{-04}$	$6,4 \times 10^{-07}$	$1,7 \times 10^{+02}$

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003)

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansoholo e col., 2002.

Analisou-se todas as possibilidades de incorporação da mesma forma que foi realizada anteriormente. Ao comparar com as razões teóricas, os dados indicam que houve possivelmente, incorporação por inalação de um composto classificado como Tipo S, já que os valores das razões experimentais e teóricas estão próximos. A razão urina:fezes teórica é 3,3 vezes maior que a experimental (mesma ordem de grandeza).

Hipótese 2: Exposição crônica, apesar das atividades de produção de pastilha estarem concluídas.

Neste caso, o trabalhador poderia estar realizando outras atividades rotineiras dentro da fábrica, com exposição ocupacional ao urânio. Comparando-se a razão experimental com as teóricas verificamos na Tabela B.3.3 que a razão experimental se aproxima da razão teórica supondo-se inalação de um composto do Tipo S e que o trabalhador esteve exposto durante os 101 dias.

Tabela B.3.3 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 102 dias de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão

Tipo de Simulação	urina	fezes	razão
<i>Tipo F</i>	$9,9 \times 10^{-02}$	$9,5 \times 10^{-02}$	$1,0 \times 10^{+00}$
<i>Tipo M</i>	$4,2 \times 10^{-02}$	$2,3 \times 10^{-01}$	$1,8 \times 10^{-01}$
<i>Tipo S</i>	$1,2 \times 10^{-03}$	$2,5 \times 10^{-01}$	$4,9 \times 10^{-03}$
<i>ICRP 2003^a</i>	$1,7 \times 10^{-02}$	$2,4 \times 10^{-01}$	$6,9 \times 10^{-02}$
<i>$UO_2(UK)^b$</i>	$6,0 \times 10^{-03}$	$2,5 \times 10^{-01}$	$2,4 \times 10^{-02}$
<i>$UO_2(F)^c$</i>	$8,6 \times 10^{-03}$	$2,5 \times 10^{-01}$	$3,4 \times 10^{-02}$
<i>$UO_2(UK_2)^b$</i>	$3,3 \times 10^{-03}$	$2,5 \times 10^{-01}$	$1,3 \times 10^{-02}$
<i>Ingestão</i>	$1,1 \times 10^{-03}$	$9,0 \times 10^{-01}$	$1,2 \times 10^{-03}$

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003)

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansbolo e col., 2002.

Hipótese 3: Exposição de curta duração, via inalação, com incorporação substancialmente superior à incorporação crônica diária que o trabalhador poderia ter durante os 68 dias.

Esta hipótese considera que o trabalhador sofreu uma incorporação por inalação de duração limitada de compostos com o DAMA de $1\mu m$. As frações da incorporação teoricamente esperadas nas amostras de 24 horas de urina, de fezes e a razão urina : fezes estão apresentadas na Tabela B.3.4, para amostras coletadas um dia após a exposição.

Tabela B.3.4 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando-se incorporação de curta duração e coleta de fezes e urina 1 dia após exposição

Incorporação	urina	fezes	Urina/fezes
<i>Tipo M</i>	$1,8 \times 10^{-02}$	$5,7 \times 10^{-02}$	$3,2 \times 10^{-01}$
<i>Tipo S</i>	$4,4 \times 10^{-04}$	$6,1 \times 10^{-02}$	$7,2 \times 10^{-03}$
<i>UO_2 ICRP 2003^a</i>	$4,5 \times 10^{-03}$	$6,0 \times 10^{-02}$	$7,5 \times 10^{-02}$
<i>UO_2 (UK)^b</i>	$7,7 \times 10^{-04}$	$6,1 \times 10^{-02}$	$1,3 \times 10^{-02}$
<i>UO_2(F)^c</i>	$1,4 \times 10^{-03}$	$6,1 \times 10^{-02}$	$2,3 \times 10^{-02}$
<i>UO_2(UK₂)^b</i>	$8,4 \times 10^{-04}$	$6,1 \times 10^{-02}$	$1,4 \times 10^{-02}$
<i>Ingestão composto insolúvel</i>	$1,3 \times 10^{-03}$	$2,8 \times 10^{-01}$	$4,5 \times 10^{-03}$

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003).

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansorbolo e col., 2002.

Comparando-se o modelo teórico com os dados experimentais verificamos que a razão urina:fezes experimental está na mesma ordem de grandeza da razão teórica esperada para inalação de um composto do tipo S e exposição via ingestão. Pode ter ocorrido uma exposição, tanto por inalação de um composto do Tipo S, no dia anterior ao dia da coleta da amostra, como por ingestão.

B.4 - Caso 6 Avaliação do trabalhador 273 em 2002

a) Descrição do caso:

Período de Exposição: 68 dias

Data de coleta: 08/12/02 - Equivale a 323 dias após o início da exposição crônica de 68 dias, ou coleta da amostra 255 dias após o término da exposição.

As concentrações de ^{238}U nas amostras de fezes e urina e a razão urina:fezes do trabalhador 273 estão apresentadas na Tabela B.4.1. As amostras de fezes e urina apresentam concentrações próximas ao que seria esperado devido à exposição ambiental, como pode ser observado na Tabela B.4.1. Sendo assim, não é possível calcular a razão urina:fezes após o desconto da contribuição ambiental.

Tabela B.4.1 – Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 273 , amostras coletadas em 08/12/02

Código do trabalhador	Função	Dias após o início da operação ^a	^{238}U		
			Fezes mBq/dia	Urina mBq/dia	Urina:Fezes Líquida ^b
273	<i>retífica</i>	323	Bg	Bg	-

^a data da coleta das amostras de excreta

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes

B.5- Caso 7 Avaliação do trabalhador 275 em 2002

a) Descrição do caso:

Período de Exposição: 68 dias

Data de coleta: 16/08/02 - Equivale a 209 dias após o início da exposição crônica de 68 dias, ou coleta da amostra 141 dias após o término da exposição.

Para esse trabalhador a atividade de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina: fezes experimental estão apresentadas na Tabela B.5.1.

Tabela B.5.1 – Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 275, amostras coletadas em 16/08/02

Código do trabalhador	Função	Dias após o início da operação ^a	^{238}U		
			Fezes mBq/dia	Urina mBq/dia	Urina:Fezes Líquida ^b
275	retífica	209	20,5	0,012	$5,8 \times 10^{-04}$

^a data da coleta das amostras de excreta

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes

a) Hipóteses testadas

Hipótese 1:Exposição crônica via inalação seguido de um período sem exposição com a fábrica parada

Esta hipótese considera que o trabalhador esteve exposto durante 68 dias a um composto de UO_2 . Como nos outros casos, a inalação é considerada a principal via de incorporação. A simulação foi feita considerando-se uma incorporação contínua durante 68 dias de trabalho. Considera-se que as amostras de fezes e urina foram coletadas 209 dias após o início daquela operação da Unidade 2.

As razões urina:fezes teóricas para os diferentes tipos de “solubilidade” estão apresentadas na Tabela B.5.2.

Tabela B.5.2 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 68 dias de compostos tipo F, M, S e UO₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão e coleta das amostras 209 dias após o início da exposição

Tipo de Simulação	urina	fezes	razão
<i>Tipo F</i>	2,0X10 ⁻⁰³	1,3 X10 ⁻⁰⁵	1,5X10 ⁺⁰²
<i>Tipo M</i>	8,8X10 ⁻⁰²	2,1X10 ⁻⁰³	4,2X10 ⁺⁰⁰
<i>Tipo S</i>	4,4X10 ⁻⁰⁴	5,3X10 ⁻⁰³	8,2X10 ⁻⁰²
<i>ICRP 2003^a</i>	5,0X10 ⁻⁰³	4,0X10 ⁻⁰³	1,2X10 ⁺⁰⁰
<i>UO₂ (UK)^b</i>	2,4X10 ⁻⁰³	4,8X10 ⁻⁰³	4,9X10 ⁻⁰¹
<i>UO₂(F)^c</i>	3,2X10 ⁻⁰³	4,6X10 ⁻⁰³	6,9X10 ⁻⁰¹
<i>UO₂(UK₂)^b</i>	1,1X10 ⁻⁰³	5,1X10 ⁻⁰³	2,1X10 ⁻⁰¹
<i>Ingestão composto insolúvel</i>	1,6X10 ⁻⁰⁵	1,1X10 ⁻⁰⁷	1,5X10 ⁺⁰²

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003)

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansbolo e col., 2002

Analisou-se todas as possibilidades de incorporação da mesma forma que os casos anteriores. Ao comparar a razão urina:fezes experimental com as razões urina :fezes teóricas, os dados não indicam ter havido incorporação por inalação de um composto classificado como Tipo S, já que os valores das razões experimentais e teóricas não estão próximos.

Hipótese 2: Exposição Crônica apesar das atividades de produção de pastilha estarem concluídas

Neste caso, o trabalhador poderia estar realizando outras atividades rotineiras dentro da fábrica, com exposição ocupacional ao urânio. Comparando-se a razão experimental com as teóricas verificamos na Tabela B.5.3 que a razão experimental não se aproxima da razão teórica indicando que possivelmente o trabalhador esteve não esteve exposto durante os 208 dias

Tabela B.5.3 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 208 dias de compostos tipo F, M, S e UO₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão

Tipo de Simulação	urina	fezes	razão
<i>Tipo F</i>	1,0X10 ⁻⁰¹	9,5X10 ⁻⁰²	1,1X10 ⁺⁰⁰
<i>Tipo M</i>	5,8X10 ⁻⁰²	2,3X10 ⁻⁰¹	2,5X10 ⁻⁰¹
<i>Tipo S</i>	1,9X10 ⁻⁰³	2,6X10 ⁻⁰¹	7,4X10 ⁻⁰³
<i>ICRP 2003^a</i>	2,5X10 ⁻⁰²	2,5X10 ⁻⁰¹	1,0X10 ⁻⁰¹
<i>UO₂ (UK)^b</i>	9,8X10 ⁻⁰³	2,6X10 ⁻⁰¹	3,8X10 ⁻⁰²
<i>UO₂(F)^c</i>	1,4X10 ⁻⁰²	2,6X10 ⁻⁰¹	5,3X10 ⁻⁰²
<i>UO₂(UK₂)^b</i>	5,0X10 ⁻⁰³	2,6X10 ⁻⁰¹	1,9X10 ⁻⁰²
<i>Ingestão</i>	1,1X10 ⁻⁰³	9,0X10 ⁻⁰¹	1,2X10 ⁻⁰³

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003)

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansorbolo e col., 2002

Hipótese 3: Exposição de curta duração, via inalação, com incorporação substancialmente superior à incorporação crônica diária que o trabalhador poderia ter durante os 68 dias.

Para este cenário simulou-se a incorporação única de UO₂, considerando as diferentes solubilidades. Comparando-se a razão urina:fezes experimental com as razões derivadas a partir dos modelos teóricos e simulando uma incorporação única observa-se que a razão urina:fezes experimental está na mesma ordem de grandeza da razão teórica apresentadas na Tabela B.5.4, sugerindo que pode ter ocorrido uma exposição eventual, quando se assume que a coleta da excreção urinária e fecal foi realizada dois ou três dias após a incorporação por inalação e ingestão de um composto Tipo S. Vale ressaltar que no dia da coleta a fábrica não estava em operação indicando que pode ter ocorrido uma incorporação eventual próxima ao dia da coleta da amostra de fezes e urina.

Tabela B.5.4 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando-se incorporação de curta duração

Incorporação	Urina/fezes 1º dia	Urina/fezes 2º dia	Urina/fezes 3º dia	Urina/fezes 4º dia	Urina/fezes 5º dia
<i>Tipo M</i>	$3,3 \times 10^{-01}$	$1,3 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^{-2}$	$4,5 \times 10^{-02}$	$1,0 \times 10^{-2}$
<i>Tipo S</i>	$7,2 \times 10^{-03}$	$3,9 \times 10^{-4}$	$4,9 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-03}$	$2,3 \times 10^{-3}$
<i>UO₂ ICRP 2003^a</i>	$7,5 \times 10^{-02}$	$1,1 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-02}$	$3,3 \times 10^{-2}$
<i>UO₂ (UK)^b</i>	$1,3 \times 10^{-02}$	$3,4 \times 10^{-3}$	$3,5 \times 10^{-3}$	$5,5 \times 10^{-03}$	$1,1 \times 10^{-2}$
<i>UO₂(F)^c</i>	$2,3 \times 10^{-02}$	$5,9 \times 10^{-3}$	$4,9 \times 10^{-3}$	$7,4 \times 10^{-03}$	$1,5 \times 10^{-2}$
<i>UO₂(UK₂)^b</i>	$1,4 \times 10^{-02}$	$2,9 \times 10^{-3}$	$2,3 \times 10^{-3}$	$3,3 \times 10^{-03}$	$6,3 \times 10^{-3}$
<i>Ingestão composto insolúvel</i>	$4,5 \times 10^{-03}$	$1,8 \times 10^{-4}$	$1,9 \times 10^{-4}$	$4,1 \times 10^{-04}$	$9,6 \times 10^{-4}$

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003)

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansbolo e col., 2002

B.6– Caso 8 Avaliação do Trabalhador 275 em 2003

a) Descrição do caso

Análise de dados do mesmo trabalhador coletados em 2003

Em dezembro de 2002, a fábrica iniciou uma nova operação com duração de 4 meses aproximadamente. No ano de 2003 foram coletadas amostras de fezes e urina, em 17 de abril de 2003, desse trabalhador e determinou-se a concentração de urânio nessas amostras. Essas análises fazem parte do trabalho realizado por Xavier, onde foram analisadas as concentrações de urânio em amostras de fezes e de urina de diversos trabalhadores da FCN (Xavier, 2005). Este trabalhador esteve exposto durante 67 dias. A

coleta das amostras foi realizada no dia seguinte após o término da exposição. Os resultados de concentração de urânio nas fezes estão na Tabela B.6.1.

Tabela B.6.1 – Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 275, amostras coletadas em 16/02/03

Código do trabalhador	Função	Dias após o início da operação ^a	^{238}U		
			Fezes mBq/dia	Urina mBq/dia	Urina:Fezes Líquida ^b
275	<i>retífica</i>	68	165	0,07	$4,1 \times 10^{-4}$

^a data da coleta das amostras de excreta

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes

b) **Hipóteses Testadas:** A amostra foi coletada 68 dias após o início da produção

Hipótese 1: Exposição crônica via inalação e ingestão durante o período de produção de pastilha

Esta hipótese considera que o trabalhador esteve exposto durante 67 dias a um composto de UO_2 . Como nos outros casos, a inalação é considerada a principal via de incorporação. A simulação foi feita considerando-se uma incorporação contínua durante 67 dias de trabalho. Considera-se que as amostras de fezes e urina foram coletadas 68 dias após o início daquela operação da Unidade 2. As razões urina:fezes teóricas para os diferentes tipos de “solubilidade estão apresentadas na Tabela 7.42.

Comparando-se as razões urina:fezes experimental com as razões teóricas observa-se que não estão na mesma ordem de grandeza. Este resultado mostra que a exposição ocorreu de uma maneira distinta às apresentadas na Tabela B.6.2.

Tabela B.6.2 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 67 dias de compostos tipo F, M, S e UO₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão e coleta das amostras 68 dias após o início da exposição

Tipo de Simulação	Urina	Fezes	Razão urina:fezes
<i>Tipo F</i>	9,4X10 ⁻⁰²	9,5X10 ⁻⁰²	9,8X10 ⁻⁰¹
<i>Tipo M</i>	3,4X10 ⁻⁰²	2,2X10 ⁻⁰¹	1,5X10 ⁻⁰¹
<i>Tipo S</i>	9,5X10 ⁻⁰⁴	2,4X10 ⁻⁰¹	3,9X10 ⁻⁰³
<i>ICRP 2003^a</i>	1,3X10 ⁻⁰²	2,4X10 ⁻⁰¹	5,6X10 ⁻⁰²
<i>UO₂ (UK)^b</i>	4,5X10 ⁻⁰³	2,4X10 ⁻⁰¹	1,8X10 ⁻⁰²
<i>UO₂(F)^c</i>	6,6X10 ⁻⁰³	2,4X10 ⁻⁰¹	2,7X10 ⁻⁰²
<i>UO₂(UK)^b</i>	2,6X10 ⁻⁰³	2,4X10 ⁻⁰¹	1,1X10 ⁻⁰²
<i>Ingestão composto insolúvel</i>	1,0X10 ⁻⁰³	9,0X10 ⁻⁰¹	1,1X10 ⁻⁰³

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003)

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansbolo e col., 2002

Hipótese 2: Exposição de curta duração, via inalação, com incorporação substancialmente superior à incorporação crônica diária que o trabalhador poderia ter durante os 68 dias.

Para este cenário simulou-se a incorporação única de UO₂, considerando as diferentes solubilidades. As razões urina:fezes teóricas estão apresentadas na Tabela B.5.4 e indicam que a amostra foi coletada dois ou três dias após à incorporação. Comparando-se a razão urina:fezes experimental com as razões derivadas a partir dos modelos teóricos, observa-se que a razão urina:fezes experimental está muito próxima da razão teórica para inalação de composto insolúvel, Tipo S e para ingestão.

B.7- Caso 9 Avaliação do trabalhador 215 em 2002

a) Descrição do caso:

Período de Exposição: 68 dias

Data de coleta: 28/04/02 - Equivale a 99 dias após o início da exposição crônica de 68 dias, ou coleta da amostra 31 dias após o término da exposição.

Para esse trabalhador a atividade de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina: fezes experimental estão apresentadas na Tabela B.7.1.

Tabela B.7.1 – Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 215, amostras coletadas em 28/04/02

Código do trabalhador	Função	Dias após o início da operação ^a	^{238}U		
			Fezes mBq/dia	Urina mBq/dia	Urina:Fezes Líquida ^b
215	<i>retífica</i>	99	1,83	0,56	$3,0 \times 10^{-01}$

^a data da coleta das amostras de excreta

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes

b) Hipóteses Testadas: A amostra foi coletada 99 dias após o início da produção

Hipótese 1: Exposição crônica via Inalação e ingestão durante o período de produção de pastilha, seguido de um período sem exposição com a fábrica parada

Esta hipótese considera que o trabalhador esteve exposto cronicamente por 68 dias a um composto de UO_2 , como nos outros casos, e que a inalação é considerada a principal via de incorporação. Considera-se que as amostras de fezes e urina foram coletadas 99 dias após o início daquela operação da Unidade 2.

Simulando-se a incorporação de compostos com diferentes solubilidades e comparando a razão experimental e teórica na Tabela B.7.2 observa-se que a razão experimental está na mesma ordem de grandeza que a simulação de incorporação de um composto com os parâmetros de retenção pulmonar dos compostos $\text{UO}_2(\text{F})$, $\text{UO}_2(\text{UK})$ e ICRP 2003.

A razão experimental do Trabalhador 215 é diferente do restante do grupo, está na ordem de 10^{-1} , como pode ser observado na Tabela B.7.1. Isto ocorre porque o valor de concentração de urânio na amostra de fezes está muito próximo do que seria esperado em caso de exposição ambiental, indicando não ter contribuição de exposição ocupacional detectável.

Tabela B.7.2 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 68 dias de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão e coleta das amostras 99 dias após o início da exposição

Tipo de Simulação	urina	fezes	razão
<i>Tipo F</i>	$1,4 \times 10^{-02}$	$8,3 \times 10^{-05}$	$1,7 \times 10^{+02}$
<i>Tipo M</i>	$2,0 \times 10^{-02}$	$1,5 \times 10^{-02}$	$1,3 \times 10^{+00}$
<i>Tipo S</i>	$6,0 \times 10^{-04}$	$2,3 \times 10^{-02}$	$2,7 \times 10^{-02}$
<i>ICRP 2003^a</i>	$7,9 \times 10^{-03}$	$2,0 \times 10^{-02}$	$3,9 \times 10^{-01}$
<i>UO₂ (UK)^b</i>	$3,2 \times 10^{-03}$	$2,2 \times 10^{-02}$	$1,5 \times 10^{-01}$
<i>UO₂(F)^c</i>	$4,4 \times 10^{-03}$	$2,1 \times 10^{-02}$	$2,1 \times 10^{-01}$
<i>UO₂(UK)^b</i>	$1,5 \times 10^{-03}$	$2,2 \times 10^{-02}$	$6,6 \times 10^{-02}$
<i>Ingestão composto insolúvel</i>	$1,2 \times 10^{-04}$	$6,9 \times 10^{-07}$	$1,7 \times 10^{+02}$

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003)

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansbolo e col., 2002

Hipótese 2: Exposição crônica, apesar das atividades de produção de pastilhas estarem concluídas.

Neste caso, o trabalhador poderia estar realizando outras atividades rotineiras dentro da fábrica, com exposição ocupacional ao urânio. Comparando-se a razão experimental com as teóricas verificamos na Tabela B.7.3 que a razão experimental se aproxima da razão teórica de um composto classificado como Tipo M. Como a pastilha está na forma sinterizada não é possível que o composto de urânio seja do Tipo M.

Tabela B.7.3 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 99 dias de compostos tipo F, M, S e UO₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão e amostra coletada no dia seguinte

Tipo de Simulação	urina	fezes	razão
<i>Tipo F</i>	9,7X10 ⁻⁰²	9,5X10 ⁻⁰²	1,0X10 ⁺⁰⁰
<i>Tipo M</i>	4,1X10 ⁻⁰²	2,3X10 ⁻⁰¹	1,8X10 ⁻⁰¹
<i>Tipo S</i>	1,2X10 ⁻⁰³	2,5X10 ⁻⁰¹	4,8X10 ⁻⁰³
<i>ICRP 2003^a</i>	1,6X10 ⁻⁰²	2,4X10 ⁻⁰¹	6,8X10 ⁻⁰²
<i>UO₂ (UK)^b</i>	5,8X10 ⁻⁰³	2,5X10 ⁻⁰¹	2,3X10 ⁻⁰²
<i>UO₂(F)^c</i>	8,4X10 ⁻⁰³	2,5X10 ⁻⁰¹	3,4X10 ⁻⁰²
<i>UO₂(UK₂)^b</i>	3,1X10 ⁻⁰³	2,5X10 ⁻⁰¹	1,3X10 ⁻⁰²
<i>Ingestão</i>	1,0X10 ⁻⁰³	9,0X10 ⁻⁰¹	1,2X10 ⁻⁰³

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003)

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansorbolo e col., 2002

➤ **Simulação de Incorporação por inalação de um composto Tipo S já que a pastilha está na forma sinterizada:**

Sabendo que a atividade incorporada é calculada pela equação:

$$I = \frac{M}{m(t)} (Bq)$$

onde, M é o resultado da medida e m(t) é a fração da incorporação de 1Bq esperada, aplicando um modelo teórico. Utilizando o dado de excreção urinária de 0,56 mBq/dia, calcula-se um valor de incorporação diária de 0,46Bq. Partindo deste valor de incorporação, espera-se encontrar nas fezes uma atividade diária equivalente 117 mBq. Este valor é maior que o valor experimental encontrado de 1,8 mBq/dia. Logo, é provável que não tenha ocorrido inalação de um composto Tipo S depois das atividades concluídas.

Hipótese 3: Exposição de curta duração, via inalação, com incorporação substancialmente superior à incorporação crônica diária que o trabalhador poderia ter durante os 68 dias.

Para este cenário simulou-se a incorporação única de UO_2 , considerando as diferentes solubilidades. As razões urina:fezes teóricas estão apresentadas na Tabela B.7.4 assumindo-se que a amostra foi coletada no dia seguinte à exposição e também três dias após. Comparando-se a razão urina:fezes experimental com as razões derivadas a partir dos modelos teóricos, observa-se que a razão urina:fezes experimental está muito próxima da razão teórica para inalação de composto Tipo M, quando assume-se que a coleta da excreção urinária e fecal foi realizada 1 dia após a incorporação. Esta análise indica que pode ter ocorrido uma incorporação próxima ao dia da coleta da amostra de fezes e urina.

Tabela B.7.4 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando-se incorporação de curta duração e coleta de fezes e urina 1 dia após exposição

Incorporação	urina	fezes	Urina/fezes
<i>Tipo M</i>	$1,8 \times 10^{-02}$	$5,7 \times 10^{-02}$	$3,2 \times 10^{-01}$
<i>Tipo S</i>	$4,4 \times 10^{-04}$	$6,1 \times 10^{-02}$	$7,2 \times 10^{-03}$
<i>UO2 ICRP 2003^a</i>	$4,5 \times 10^{-03}$	$6,0 \times 10^{-02}$	$7,5 \times 10^{-02}$
<i>UO2 (UK)^b</i>	$7,7 \times 10^{-04}$	$6,1 \times 10^{-02}$	$1,3 \times 10^{-02}$
<i>UO2(F)^c</i>	$1,4 \times 10^{-03}$	$6,1 \times 10^{-02}$	$2,3 \times 10^{-02}$
<i>UO2(UK₂)^d</i>	$8,4 \times 10^{-04}$	$6,1 \times 10^{-02}$	$1,4 \times 10^{-02}$
<i>Ingestão composto insolúvel</i>	$1,3 \times 10^{-03}$	$2,8 \times 10^{-01}$	$4,5 \times 10^{-03}$

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003)

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansbolo e col., 2002

➤ **Simulação de Incorporação por inalação de um composto Tipo S no dia anterior ao dia da coleta da amostra**

Testando-se a possibilidade de ter ocorrido inalação de um composto Tipo S, já que nesta etapa o UO₂ está na forma sinterizada, fez-se a seguinte suposição: sabendo que a atividade incorporada é calculada pela equação:

$$I = \frac{M}{m(t)} (Bq)$$

onde, M é o resultado da medida e m(t) é a fração da incorporação de 1Bq esperada, aplicando um modelo teórico. Utilizando o dado de excreção urinária de 0,56 mBq/dia, calcula-se um valor de incorporação diária de 1,2Bq. Partindo deste valor de incorporação, espera-se encontrar nas fezes uma atividade diária equivalente 77 mBq.

Este valor é maior que o valor experimental encontrado que foi 1,8 mBq/dia. Logo, é provável que não tenha ocorrido inalação de um composto Tipo S em um evento recente.

Conclusão:

Neste caso, o trabalhador poderia estar realizando outras atividades rotineiras dentro da fábrica, com exposição ocupacional ao urânio. Executou alguma tarefa que resultou na incorporação de um composto mais solúvel diferente de UO₂, um dia antes da coleta das amostras. Existe a possibilidade ainda de ter incorporado um composto tipo S cronicamente durante 67 dias. A dificuldade da análise é devido ao fato da concentração de ²³⁸U, nas fezes, estar próxima da contribuição ambiental.

Como o valor da excreção fecal de ²³⁸U do trabalhador era próxima à contribuição ambiental testou-se as hipóteses considerando a excreção fecal de ²³⁴U. A Tabela B.6.5 apresenta a atividade de ²³⁴U nas amostras de urina e fezes e a razão urina:fezes experimental .

Tabela B.7.5 – Atividades de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 215, amostras coletadas em 28/04/02

Código do trabalhador	Função	Dias após o início da operação ^a	^{234}U		
			Fezes mBq/dia	Urina mBq/dia	Urina:Fezes Líquida ^b
215	<i>retífica</i>	99	32	1,16	$3,6 \times 10^{-2}$

^a data da coleta das amostras de excreta

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes

c) Hipóteses Testadas: A amostra foi coletada 99 dias após o início da produção

Hipótese 1: Exposição crônica via inalação e ingestão durante o período de produção de pastilha, seguido de um período sem exposição com a fábrica parada.

Simulando-se a incorporação de compostos com diferentes solubilidades e comparando a razão experimental e teórica na Tabela B.7.2 observa-se que a razão experimental está na mesma ordem de grandeza que a simulação de incorporação de um composto tipo S.

Hipótese 2: Exposição crônica, apesar das atividades de produção de pastilhas estarem concluídas.

Neste caso, o trabalhador poderia estar realizando outras atividades rotineiras dentro da fábrica, com exposição ocupacional ao urânio. Comparando-se a razão experimental com as teóricas verificamos na Tabela B.7.3 que a razão experimental não se aproxima da razão teórica para um composto Tipo S. O trabalhador poderia estar exposto durante os 98 dias a um composto Tipo $\text{UO}_2(\text{F})$, mas esta hipótese dificilmente ocorreria na Unidade 2.

Hipótese 3: Exposição de curta duração, via inalação, com incorporação substancialmente superior à incorporação crônica diária que o trabalhador poderia ter durante os 68 dias.

Para este cenário, simulou-se a incorporação única de UO_2 , considerando as diferentes solubilidades. As razões urina:fezes teóricas estão apresentadas na Tabela B.7.4. A razão

experimental ao ser comparada com as razões teóricas indica que as amostras poderiam ter sido coletadas um dia após uma incorporação por inalação de um composto Tipo $UO_2(F)$ ou cinco dias após uma inalação recente de um composto cujos parâmetros estão descritos no Supporting Guidance 3 da ICRP 2003.

B.8- Caso 10 Avaliação do trabalhador 215 em 2003

a) Descrição do caso:

Data de coleta: 17/04/03 - Equivale a 127 dias após o início da exposição crônica e coleta no dia seguinte

O Caso 10 refere-se à coleta de amostras de urina e fezes do Trabalhador 215, realizada em 2003. Essas análises fazem parte do trabalho realizado por Xavier, onde analisou fezes e urina de diversos trabalhadores em diferentes funções. (Xavier, 2005). As concentrações de urânio na amostra de urina e fezes, assim como a razão urina:fezes experimental estão apresentadas na Tabela B.8.1 .

Tabela B.8.1 – Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 215, amostras coletadas em 17/04/03

Código do trabalhador	Função	Dias após o início da operação ^a	^{238}U		
			Fezes mBq/dia	Urina mBq/dia	Urina:Fezes Líquida ^b
215	<i>retífica</i>	128	27,2	0,42	$1,5 \times 10^{-2}$

^a data da coleta das amostras de excreta

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes

b) Hipóteses Testadas: A amostra foi coletada 128 dias após o início da produção

Hipótese 1: Exposição crônica via inalação e ingestão durante o período de produção de pastilha

Esta hipótese considera que o trabalhador esteve exposto durante 127 dias a um composto de UO_2 sendo a inalação a principal via de incorporação. Considera-se que as amostras de fezes e urina foram coletadas 128 dias após o início daquela operação da Unidade 2. As razões urina:fezes teóricas para os diferentes tipos de “solubilidade estão apresentadas na

Tabela B.8.2. Comparando-se as razões urina:fezes experimental, $1,5 \times 10^{-2}$, com as razões teóricas apresentadas na Tabela B.82, observa-se que a razão experimental se assemelha com o valor da razão urina:fezes teórica derivada para $UO_2(UK_2)$. Estes parâmetros de retenção pulmonar representam um composto de maior solubilidade nos pulmões comparado ao composto Tipo S.

Tabela B.8.2 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 127 dias de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão e coleta das amostras 128 dias após o início da exposição

Tipo de Simulação	Urina	Fezes	Razão
<i>Tipo F</i>	$9,9 \times 10^{-02}$	$9,5 \times 10^{-02}$	$1,0 \times 10^{+00}$
<i>Tipo M</i>	$4,7 \times 10^{-02}$	$2,3 \times 10^{-01}$	$2,0 \times 10^{-01}$
<i>Tipo S</i>	$1,4 \times 10^{-03}$	$2,5 \times 10^{-01}$	$5,5 \times 10^{-03}$
<i>ICRP 2003^a</i>	$1,9 \times 10^{-02}$	$2,5 \times 10^{-01}$	$7,8 \times 10^{-02}$
<i>UO₂ (UK)^b</i>	$6,7 \times 10^{-03}$	$2,5 \times 10^{-01}$	$2,7 \times 10^{-02}$
<i>UO₂(F)^c</i>	$1,0 \times 10^{-02}$	$2,5 \times 10^{-01}$	$3,9 \times 10^{-02}$
<i>UO₂(UK)^b</i>	$3,7 \times 10^{-03}$	$2,5 \times 10^{-01}$	$1,5 \times 10^{-02}$
<i>Ingestão composto insolúvel</i>	$1,1 \times 10^{-03}$	$9,0 \times 10^{-01}$	$1,2 \times 10^{-03}$

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003)

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansorbolo e col., 2002

Hipótese 2: Exposição de curta duração, via inalação, com incorporação substancialmente superior à incorporação crônica diária que o trabalhador poderia ter durante os 127 dias.

Para este cenário simulou-se a incorporação única de UO_2 , considerando as diferentes solubilidades. As razões urina:fezes teóricas estão apresentadas na Tabela B.8.3, assumindo-se que a amostra foi coletada no dia seguinte à exposição e também três dias após. Comparando-se as razões urina:fezes experimental com as razões derivadas a partir

dos modelos teóricos, observa-se que a razão urina:fezes experimental se assemelha com os valores de razão urina:fezes teórica de um composto Tipo $UO_2(UK)$ ou $UO_2(UK_2)$, quando se assume que a coleta da excreção urinária e fecal foi realizada 1 dia após a incorporação. O valor da razão também é semelhante a razão teórica derivada dos parâmetros propostos no Supporting Guidance 3 da ICRP ICRP (2003), supondo que a coleta foi realizada até 4 dias após a incorporação. Esta análise indica que pode ter ocorrido uma incorporação próxima ao dia da coleta da amostra de fezes e urina.

Tabela B.8.3 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando-se incorporação de curta duração

Incorporação	Urina/fezes 1º dia	Urina/fezes 2º dia	Urina/fezes 3º dia	Urina/fezes 4º dia	Urina/fezes 5º dia
<i>Tipo M</i>	$3,3 \times 10^{-01}$	$1,3 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^{-2}$	$4,5 \times 10^{-02}$	$1,0 \times 10^{-2}$
<i>Tipo S</i>	$7,2 \times 10^{-03}$	$3,9 \times 10^{-4}$	$4,9 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-03}$	$2,3 \times 10^{-3}$
<i>UO_2 ICRP 2003^a</i>	$7,5 \times 10^{-02}$	$1,1 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-02}$	$3,3 \times 10^{-2}$
<i>$UO_2(UK)^b$</i>	$1,3 \times 10^{-02}$	$3,4 \times 10^{-3}$	$3,5 \times 10^{-3}$	$5,5 \times 10^{-03}$	$1,1 \times 10^{-2}$
<i>$UO_2(F)^c$</i>	$2,3 \times 10^{-02}$	$5,9 \times 10^{-3}$	$4,9 \times 10^{-3}$	$7,4 \times 10^{-03}$	$1,5 \times 10^{-2}$
<i>$UO_2(UK_2)^b$</i>	$1,4 \times 10^{-02}$	$2,9 \times 10^{-3}$	$2,3 \times 10^{-3}$	$3,3 \times 10^{-03}$	$6,3 \times 10^{-3}$
<i>Ingestão composto insolúvel</i>	$4,5 \times 10^{-03}$	$1,8 \times 10^{-4}$	$1,9 \times 10^{-4}$	$4,1 \times 10^{-04}$	$9,6 \times 10^{-4}$

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003))

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansbolo e col., 2002

A razão experimental se aproxima das razões teóricas considerando que a amostra foi coletada 9 dias ou mais após a inalação de um composto Tipo S, como mostra a Tabela B.9.4.

Tabela B.8.4: Razões urina:fezes teóricas a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO₂ com diferentes parâmetros de absorção, e incorporação via ingestão, considerando-se incorporação de curta duração e coleta de fezes e urina até 20 dias após a exposição.

Dias após uma incorporação	Razão urina:fezes após única incorporação				
	S	UO ₂ (ICRP) ^a	UO ₂ (UK) ^b	UO ₂ (F) ^c	UO ₂ (UK ₂) ^b
1	7,2 x 10 ⁻⁰³	7,5 x 10 ⁻⁰²	3,0 x 10 ⁻⁰²	2,3 x 10 ⁻⁰²	1,4 x 10 ⁻⁰²
5	2,4 x 10 ⁻⁰³	3,4 x 10 ⁻⁰²	1,1 x 10 ⁻⁰²	1,5 x 10 ⁻⁰²	6,4 x 10 ⁻⁰³
6	5,0 x 10 ⁻⁰³	6,9 x 10 ⁻⁰²	2,4 x 10 ⁻⁰²	3,1 x 10 ⁻⁰²	1,3 x 10 ⁻⁰²
7	9,0 x 10 ⁻⁰³	1,2 x 10 ⁻⁰¹	4,3 x 10 ⁻⁰²	5,5 x 10 ⁻⁰²	2,2 x 10 ⁻⁰²
8	1,3 x 10 ⁻⁰²	1,8 x 10 ⁻⁰¹	6,2 x 10 ⁻⁰²	8,1 x 10 ⁻⁰²	3,2 x 10 ⁻⁰²
9	1,5 x 10 ⁻⁰²	2,2 x 10 ⁻⁰¹	7,5 x 10 ⁻⁰²	9,7 x 10 ⁻⁰²	3,8 x 10 ⁻⁰²
10	1,7 x 10 ⁻⁰²	2,3 x 10 ⁻⁰¹	8,1 x 10 ⁻⁰²	1,1 x 10 ⁻⁰¹	4,1 x 10 ⁻⁰²
11	1,7 x 10 ⁻⁰²	2,4 x 10 ⁻⁰¹	8,4 x 10 ⁻⁰²	1,1 x 10 ⁻⁰¹	4,2 x 10 ⁻⁰²
15	1,7 x 10 ⁻⁰²	2,4 x 10 ⁻⁰¹	8,6 x 10 ⁻⁰²	1,1 x 10 ⁻⁰¹	4,2 x 10 ⁻⁰²
20	1,7 x 10 ⁻⁰²	2,5 x 10 ⁻⁰¹	8,8 x 10 ⁻⁰²	1,2 x 10 ⁻⁰¹	4,2 x 10 ⁻⁰²

B.9- Caso 11 Avaliação do trabalhador 216 em 2002

a) Descrição do caso:

Período de Exposição: 68 dias

Data de coleta: 19/05/02 - Equivale a 120 dias após o início da exposição crônica de 68 dias, ou coleta da amostra 52 dias após o término da exposição.

Para esse trabalhador a atividade de ²³⁸U nas amostras de urina e fezes e razão urina: fezes experimental estão apresentadas na Tabela B.9.1.

Tabela B.9.1– Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 216, amostras coletadas em 19/05/02

Código do trabalhador	Função	Dias após o início da operação ^a	^{238}U		
			Fezes mBq/dia	Urina mBq/dia	Urina:Fezes Líquida ^b
216	<i>retífica</i>	120	bg	0,22	-

^a data da coleta das amostras de excreta

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes

Como não foi possível calcular a razão urina:fezes a partir da concentração do ^{238}U nas fezes e urina, a estimativa da concentração de ^{234}U na urina e o que foi medido na amostra de fezes estão apresentados na Tabela B.9.2.

Tabela B.9.2 – Atividades de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 216, amostras coletadas em 19/05/02

Código do trabalhador	Função	Dias após o início da operação ^a	^{234}U		
			Fezes mBq/dia	Urina mBq/dia	Urina:Fezes Líquida ^b
216	<i>retífica</i>	120	4,9	0,38	$7,7 \times 10^{-2}$

^a data da coleta das amostras de excreta

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes

b) Hipóteses Testadas: A amostra foi coletada 120 dias após o início da produção

Hipótese 1: Exposição crônica via Inalação e ingestão durante o período de produção de pastilha, seguido de um período sem exposição com a fábrica parada

Esta hipótese considera que o trabalhador esteve exposto cronicamente por 68 dias a um composto de UO_2 , como nos outros casos, e que a inalação é considerada a principal via de incorporação. Considera-se que as amostras de fezes e urina foram coletadas 120 dias após o início daquela operação da Unidade 2, simula-se a incorporação de compostos com diferentes solubilidades. As razões teóricas estão apresentadas na Tabela B.9.3 . A razão experimental se aproxima da razão urina:fezes teórica de um composto) Tipo $UO_2(UK_2)$. Também é compatível com a incorporação crônica de um composto padrão Tipo S.

Tabela B.9.3 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação durante 68 dias por inalação de alguns compostos de urânio com parâmetros descritos na literatura e ingestão e coleta 120dias após o início da exposição

Tipo de Simulação	urina	fezes	razão
<i>Tipo F</i>	$8,3 \times 10^{-03}$	$5,3 \times 10^{-05}$	$1,6 \times 10^{+02}$
<i>Tipo M</i>	$1,6 \times 10^{-02}$	$9,5 \times 10^{-03}$	$1,7 \times 10^{+00}$
<i>Tipo S</i>	$5,4 \times 10^{-04}$	$1,5 \times 10^{-02}$	$3,5 \times 10^{-02}$
<i>ICRP 2003^a</i>	$7,0 \times 10^{-03}$	$1,3 \times 10^{-02}$	$5,2 \times 10^{-01}$
<i>UO2 (UK)^b</i>	$2,9 \times 10^{-03}$	$1,5 \times 10^{-02}$	$2,0 \times 10^{-01}$
<i>UO2(F)^c</i>	$4,0 \times 10^{-03}$	$1,4 \times 10^{-02}$	$2,8 \times 10^{-01}$
<i>UO2(UK₂)^b</i>	$1,3 \times 10^{-03}$	$1,5 \times 10^{-02}$	$8,8 \times 10^{-02}$
<i>Ingestão composto insolúvel</i>	$6,9 \times 10^{-05}$	$4,4 \times 10^{-07}$	$1,6 \times 10^{+02}$

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003)

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansbololo e col., 2002.

Hipótese 2: Exposição crônica, apesar das atividades de produção de pastilhas estarem concluídas.

Neste caso, o trabalhador poderia estar realizando outras atividades rotineiras dentro da fábrica, com exposição ocupacional ao urânio. Simula-se que o trabalhador esteve exposto durante os 120 dias ao UO_2 . As razões teóricas estão apresentadas na Tabela B.9.4 e a razão experimental está na mesma ordem da razão cujos parâmetros foram exemplificados no Supporting Guidance 3 (ICRP 2003).

Tabela B.9.4 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 120 dias de compostos tipo F, M, S e UO₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão e amostra coletada no dia seguinte

Tipo de Simulação	urina	fezes	razão
<i>Tipo F</i>	9,9X10 ⁻⁰²	9,5X10 ⁻⁰²	1,0X10 ⁺⁰⁰
<i>Tipo M</i>	4,5X10 ⁻⁰²	2,3X10 ⁻⁰¹	2,0X10 ⁻⁰¹
<i>Tipo S</i>	1,3X10 ⁻⁰³	2,5X10 ⁻⁰¹	5,3X10 ⁻⁰³
<i>ICRP 2003^a</i>	1,8X10 ⁻⁰²	2,5X10 ⁻⁰¹	7,5X10 ⁻⁰²
<i>UO₂ (UK)^b</i>	6,7X10 ⁻⁰³	2,5X10 ⁻⁰¹	2,6X10 ⁻⁰²
<i>UO₂(F)^c</i>	9,6X10 ⁻⁰³	2,5X10 ⁻⁰¹	3,8X10 ⁻⁰²
<i>UO₂(UK₂)^b</i>	3,6X10 ⁻⁰³	2,5X10 ⁻⁰¹	1,4X10 ⁻⁰²
<i>Ingestão composto insolúvel</i>	1,1X10 ⁻⁰³	9,0X10 ⁻⁰¹	1,2X10 ⁻⁰³

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003)

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansorbolo e col., 2002.

Hipótese 3: Exposição de curta duração, via inalação, com incorporação substancialmente superior à incorporação crônica diária que o trabalhador poderia ter durante os 119 dias.

Para este cenário simulou-se a incorporação única de UO₂, considerando as diferentes solubilidades. As razões urina:fezes teóricas estão apresentadas na Tabela B.9.5, assumindo-se que a amostra foi coletada até 5 dias após uma única incorporação.

Tabela B.9.5 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando-se incorporação de curta duração

Incorporação	Urina/fezes 1º dia	Urina/fezes 2º dia	Urina/fezes 3º dia	Urina/fezes 4º dia	Urina/fezes 5º dia
<i>Tipo M</i>	3,3x10 ⁻⁰¹	1,3x10 ⁻²	2,0 x 10 ⁻²	4,5X10 ⁻⁰²	1,0x10 ⁻²
<i>Tipo S</i>	7,2x10 ⁻⁰³	3,9x10 ⁻⁴	4,9x10 ⁻⁴	1,1X10 ⁻⁰³	2,3x10 ⁻³
<i>UO₂ ICRP 2003^a</i>	7,5 x10 ⁻⁰²	1,1x10 ⁻²	1,0x10 ⁻²	1,6X10 ⁻⁰²	3,3x10 ⁻²
<i>UO₂ (UK)^b</i>	1,3x10 ⁻⁰²	3,4x10 ⁻³	3,5x10 ⁻³	5,5X10 ⁻⁰³	1,1x10 ⁻²
<i>UO₂ UO₂(F)^c</i>	2,3x10 ⁻⁰²	5,9x10 ⁻³	4,9x10 ⁻³	7,4X10 ⁻⁰³	1,5x10 ⁻²
<i>UO₂(UK₂)^b</i>	1,4x10 ⁻⁰²	2,9x10 ⁻³	2,3x10 ⁻³	3,3X10 ⁻⁰³	6,3x10 ⁻³
<i>Ingestão composto insolúvel</i>	4,5x10 ⁻⁰³	1,8x10 ⁻⁴	1,9x10 ⁻⁴	4,1X10 ⁻⁰⁴	9,6x10 ⁻⁴

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003)

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansbolo e col., 2002.

Esta avaliação indica que este trabalhador esteve exposto a um composto mais solúvel que o UO₂. Pode ter ocorrido alguma incorporação por inalação eventual de um composto de UO₂ com os parâmetros descritos no Supporting Guidance 3 (2003) 1 dia antes da coleta.

B.10- Caso 12 Avaliação do trabalhador 164

a) Descrição do caso:

Período de Exposição: 68 dias

Data de coleta: 15/04/02 - Equivale a 86 dias após o início da exposição crônica de 68 dias, ou coleta da amostra 18 dias após o término da exposição.

Para esse trabalhador a atividade de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina: fezes experimental estão apresentadas na Tabela B.10.1.

Tabela B.10.1 – Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 164, amostras coletadas em 15/04/02

Código do trabalhador	Função	Dias após o início da operação ^a	^{238}U		
			Fezes mBq/dia	Urina mBq/dia	Urina:Fezes Líquida ^b
164	<i>sinterização</i>	86	Bg	0,29	-

^a data da coleta das amostras de excreta

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes

Como não foi possível calcular a razão experimental em relação ao ^{238}U , calculou-se a razão em relação ao ^{234}U como mostra a Tabela B.10.2

Tabela B.10.2 – Atividades de ^{234}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 164, amostras coletadas em 15/04/02

Código do trabalhador	Função	Dias após o início da operação ^a	^{234}U		
			Fezes mBq/dia	Urina mBq/dia	Urina:Fezes Líquida ^b
164	<i>sinterização</i>	86	1,2	0,51	$4,2 \times 10^{-1}$

^a data da coleta das amostras de excreta

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes.

b) Hipóteses Testadas: A amostra foi coletada 86 dias após o início da produção

Hipótese 1: Exposição crônica via Inalação e ingestão durante o período de produção de pastilha, seguido de um período sem exposição com a fábrica parada

Esta hipótese considera que o trabalhador esteve exposto cronicamente por 68 dias a um composto de UO_2 , como nos outros casos, e que a inalação é considerada a principal via de incorporação. Considera-se que as amostras de fezes e urina foram coletadas 86 dias após o início daquela operação da Unidade 2.

Simulando-se a incorporação de compostos com diferentes solubilidades Obtém-se as razões teóricas apresentadas na Tabela B.10.3 e observa-se que as razões estão próximas das razões derivadas dos parâmetros descritos no Supporting Guidance 3 da ICRP.

Tabela B.10.3 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão Simulação da incorporação durante 68 dias por inalação de alguns compostos de urânio com parâmetros descritos na literatura e ingestão e coleta 86 dias após o início da exposição

Tipo de Simulação	urina	fezes	razão
<i>Tipo F</i>	$2,4 \times 10^{-02}$	$1,2 \times 10^{-04}$	$1,9 \times 10^{+02}$
<i>Tipo M</i>	$2,3 \times 10^{-02}$	$2,1 \times 10^{-02}$	$1,1 \times 10^{+00}$
<i>Tipo S</i>	$6,6 \times 10^{-04}$	$2,9 \times 10^{-02}$	$2,3 \times 10^{-02}$
<i>ICRP 2003^a</i>	$8,7 \times 10^{-03}$	$2,6 \times 10^{-02}$	$3,3 \times 10^{-01}$
<i>UO₂ (UK)^b</i>	$3,4 \times 10^{-03}$	$2,8 \times 10^{-02}$	$1,2 \times 10^{-01}$
<i>UO₂(F)^c</i>	$4,7 \times 10^{-03}$	$2,8 \times 10^{-02}$	$1,7 \times 10^{-01}$
<i>UO₂(UK₂)^b</i>	$1,6 \times 10^{-03}$	$2,9 \times 10^{-02}$	$5,6 \times 10^{-02}$
<i>Ingestão composto insolúvel</i>	$2,0 \times 10^{-04}$	$1,1 \times 10^{-06}$	$1,8 \times 10^{+02}$

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003)

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansbololo e col., 2002.

Simulação de Incorporação por inalação de um composto Tipo S já que o composto manipulado está na forma sinterizada considerando ^{238}U

Testando-se a possibilidade de ter ocorrido inalação de um composto Tipo S, fez-se a seguinte suposição, sabendo que a atividade incorporada é calculada pela equação:

$$I = \frac{M}{m(t)} (Bq)$$

onde, M é o resultado da medida e m(t) é a fração da incorporação de 1Bq esperada, aplicando um modelo teórico. Na Tabela B.10.2 estão apresentadas as razões urina:fezes teóricas para os diferentes tipos de “solubilidade, assumindo incorporação crônica durante 68 dias e a realização da coleta das amostras 86 dias após o início da exposição. Utilizando o dado de excreção urinária de 0,29 mBq/dia, calcula-se um valor de incorporação diária de 0,4 Bq. Partindo deste valor de incorporação, espera-se encontrar nas fezes uma atividade diária equivalente 13 mBq. Este valor é bastante coerente com o valor experimental encontrado 17 mBq, logo, é provável que tenha ocorrido inalação de um composto Tipo S.

Hipótese 2: Exposição crônica, apesar das atividades de produção de pastilhas estarem concluídas.

Neste caso, o trabalhador poderia estar realizando outras atividades rotineiras dentro da fábrica, com exposição ocupacional ao urânio. Simula-se que o trabalhador esteve exposto durante os 85 dias ao UO₂. As razões teóricas estão apresentadas na Tabela B.10.4 e não se aproximam da razão experimental.

Tabela B.10.4 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 85 dias de compostos tipo F, M, S e UO₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão e amostra coletada no dia seguinte

Tipo de Simulação	urina	fezes	razão
<i>Tipo F</i>	9,6X10 ⁻⁰²	9,5X10 ⁻⁰²	1,0X10 ⁺⁰⁰
<i>Tipo M</i>	3,8X10 ⁻⁰²	2,2X10 ⁻⁰¹	1,7X10 ⁻⁰¹
<i>Tipo S</i>	1,1X10 ⁻⁰³	2,5X10 ⁻⁰¹	4,4X10 ⁻⁰³
<i>ICRP 2003^a</i>	1,5X10 ⁻⁰²	2,4X10 ⁻⁰¹	6,3X10 ⁻⁰²
<i>UO₂ (UK)^b</i>	5,3X10 ⁻⁰³	2,5X10 ⁻⁰¹	2,1X10 ⁻⁰²
<i>UO₂(F)^c</i>	7,7X10 ⁻⁰³	2,5X10 ⁻⁰¹	3,1X10 ⁻⁰²
<i>UO₂(UK₂)^b</i>	3,0X10 ⁻⁰³	2,5X10 ⁻⁰¹	1,2X10 ⁻⁰²
<i>Ingestão composto insolúvel</i>	1,0X10 ⁻⁰³	9,0X10 ⁻⁰¹	1,1X10 ⁻⁰³

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003)

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansbolo e col., 2002.

Simulação de Incorporação por inalação de um composto Tipo S apesar das atividades de produção de pastilhas estarem concluídas.

Sabendo que a atividade incorporada é calculada pela equação:

$$I = \frac{M}{m(t)} (Bq)$$

onde, M é o resultado da medida e m(t) é a fração da incorporação de 1Bq esperada, aplicando um modelo teórico. Na Tabela B 10.3 estão apresentadas as razões urina:fezes teóricas para os diferentes tipos de “solubilidade, assumindo incorporação crônica durante 85 dias e a realização da coleta das amostras 86 dias após o início da exposição. Utilizando o dado de excreção urinária de 0,22 mBq/dia, calcula-se um valor de incorporação diária de 0,2 Bq. Partindo deste valor de incorporação, espera-se encontrar nas fezes uma atividade diária equivalente 49 mBq é acima da contribuição ambiental, seria medido nas fezes. É difícil que tenha ocorrido esse tipo de incorporação.

Hipótese 3: Exposição de curta duração, via inalação, com incorporação substancialmente superior à incorporação crônica diária que o trabalhador poderia ter durante os 68 dias.

Para este caso simulou-se a incorporação única de UO₂, considerando as diferentes solubilidades. As razões urina:fezes teóricas estão apresentadas na Tabela B.10.5 assumindo-se que a amostra foi coletada no dia seguinte à exposição e indicam que houve incorporação de composto mais solúvel com características de um composto Tipo M..

Tabela B.10.5 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando-se incorporação de curta duração

Incorporação	Urina/fezes 1º dia	Urina/fezes 2º dia	Urina/fezes 3º dia	Urina/fezes 4º dia	Urina/fezes 5º dia
<i>Tipo M</i>	$3,3 \times 10^{-01}$	$1,3 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^{-2}$	$4,5 \times 10^{-02}$	$1,0 \times 10^{-2}$
<i>Tipo S</i>	$7,2 \times 10^{-03}$	$3,9 \times 10^{-4}$	$4,9 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-03}$	$2,3 \times 10^{-3}$
<i>UO_2 ICRP 2003^a</i>	$7,5 \times 10^{-02}$	$1,1 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-02}$	$3,3 \times 10^{-2}$
<i>UO_2 (UK)^b</i>	$1,3 \times 10^{-02}$	$3,4 \times 10^{-3}$	$3,5 \times 10^{-3}$	$5,5 \times 10^{-03}$	$1,1 \times 10^{-2}$
<i>UO_2 UO_2(F)^c</i>	$2,3 \times 10^{-02}$	$5,9 \times 10^{-3}$	$4,9 \times 10^{-3}$	$7,4 \times 10^{-03}$	$1,5 \times 10^{-2}$
<i>UO_2(UK₂)^b</i>	$1,4 \times 10^{-02}$	$2,9 \times 10^{-3}$	$2,3 \times 10^{-3}$	$3,3 \times 10^{-03}$	$6,3 \times 10^{-3}$
<i>Ingestão composto insolúvel</i>	$4,5 \times 10^{-03}$	$1,8 \times 10^{-4}$	$1,9 \times 10^{-4}$	$4,1 \times 10^{-04}$	$9,6 \times 10^{-4}$

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003)

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansorbolo e col., 2002.

➤ **Simulação de Exposição e incorporação de curta duração por inalação de um composto Tipo S**

Sabendo que a atividade incorporada é calculada pela equação:

$$I = \frac{M}{m(t)} (Bq)$$

onde, M é o resultado da medida e m(t) é a fração da incorporação de 1Bq esperada, aplicando um modelo teórico. Na **Tabela B.10.4** estão apresentadas as razões urina:fezes teóricas para os diferentes tipos de “solubilidade, assumindo incorporação **de curta duração**. Utilizando o dado de excreção urinária de 0,22 mBq/dia, calcula-se um valor de incorporação diária de 0,5Bq. Partindo deste valor de incorporação, espera-se encontrar nas fezes uma atividade diária equivalente 30 mBq. Possivelmente não ocorreu esse tipo

de exposição já que este valor está acima da atividade encontrada nas fezes antes de descontar a contribuição ambiental.

B.11- Caso 13 Avaliação do trabalhador 141

a) Descrição do caso:

Período de Exposição: 76 dias

Data de coleta: 07/04/02 - Equivale a 78 dias após o início da exposição crônica de 76 dias, ou coleta da amostra 2 dias após o término da exposição.

Para esse trabalhador a atividade de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina: fezes experimental estão apresentadas na Tabela B.11.1.

Tabela B 11.1 – Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 141, amostras coletadas em 07/04/02

Código do trabalhador	Função	Dias após o início da operação*	Fezes mBq/dia	Urina mBq/dia	Urina:Fezes líquida^a
141	<i>Peneiramento</i>	78	63,4	0,52	$8,3 \times 10^{-03}$

^a data da coleta das amostras de excreta

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes.

b) Hipóteses Testadas:

Hipótese 1: Exposição Crônica via inalação e ingestão durante o período de produção Considera-se que as amostras de fezes e urina foram coletadas 78 dias após a exposição crônica de 76 dias. As razões urina:fezes teóricas para os diferentes tipos de “solubilidade” estão apresentadas na Tabela B.11.2. Comparando-se as razões urina:fezes experimental, $8,3 \times 10^{-3}$, com as razões teóricas apresentadas na Tabela B.11.2, observa-se que a razão urina:fezes experimental é compatível com a exposição a composto Tipo S ou exposição a um composto de $\text{UO}_2(\text{UK}_2)$. Este trabalhador usa todo o equipamento de proteção física (máscara panorâmica) quando está desempenhando a tarefa de peneiramento. É muito improvável que tenha tido incorporação no desempenho de suas funções.

Tabela B.11.2 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 76 dias de compostos tipo F, M, S e UO₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão e amostra coletada depois de dois dias

Tipo de Simulação	Urina	Fezes	Razão
<i>Tipo F</i>	6,2x10 ⁻²	5,3x10 ⁻²	1,7x10 ⁰
<i>Tipo M</i>	3,1x10 ⁻²	1,4x10 ⁻¹	2,2x10 ⁻¹
<i>Tipo S</i>	8,7x10 ⁻⁴	1,6x10 ⁻¹	5,5x10 ⁻³
<i>ICRP 2003^a</i>	1,2x10 ⁻²	1,5x10 ⁻¹	7,8x10 ⁻²
<i>UO₂ (UK)^b</i>	4,4x10 ⁻³	1,6x10 ⁻¹	2,8x10 ⁻²
<i>UO₂(F)^c</i>	6,2x10 ⁻³	1,6x10 ⁻¹	4,0x10 ⁻²
<i>UO₂(UK₂)^b</i>	2,3x10 ⁻³	1,6x10 ⁻¹	1,4x10 ⁻²
<i>Ingestão composto insolúvel</i>	5,2x10 ⁻⁴	5,1x10 ⁻¹	1,0x10 ⁻³

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003)

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansorbolo e col., 2002

Hipótese 2: Exposição de curta duração, via inalação, com incorporação substancialmente superior à incorporação crônica diária que o trabalhador poderia ter durante os 76 dias.

Para este cenário simulou-se a incorporação única de UO₂, considerando as diferentes solubilidades. As razões urina:fezes teóricas estão apresentadas na Tabela B.11.3, assumindo-se que a amostra foi coletada no dia seguinte ou três dias após a exposição. Comparando-se as razões urina:fezes experimental com as razões derivadas a partir dos modelos teóricos, observa-se que é muito difícil definir o composto a que o trabalhador está exposto. Várias hipóteses podem ser assumidas: incorporação de composto Tipo S no dia anterior a coleta das amostras (pouco provável); incorporação de UO₂ (UK), UO₂ (F) ou UO₂(UK₂), cerca de cinco dias antes da coleta.

Tabela B.11.3 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando-se incorporação de curta duração

Incorporação	Urina/fezes 1º dia	Urina/fezes 2º dia	Urina/fezes 3º dia	Urina/fezes 4º dia	Urina/fezes 5º dia
<i>Tipo M</i>	$3,3 \times 10^{-01}$	$1,3 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^{-2}$	$4,5 \times 10^{-02}$	$1,0 \times 10^{-2}$
<i>Tipo S</i>	$7,2 \times 10^{-03}$	$3,9 \times 10^{-4}$	$4,9 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-03}$	$2,3 \times 10^{-3}$
<i>UO_2 ICRP 2003^a</i>	$7,5 \times 10^{-02}$	$1,1 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-02}$	$3,3 \times 10^{-2}$
<i>UO_2 (UK)^b</i>	$1,3 \times 10^{-02}$	$3,4 \times 10^{-3}$	$3,5 \times 10^{-3}$	$5,5 \times 10^{-03}$	$1,1 \times 10^{-2}$
<i>UO_2 (F)^c</i>	$2,3 \times 10^{-02}$	$5,9 \times 10^{-3}$	$4,9 \times 10^{-3}$	$7,4 \times 10^{-03}$	$1,5 \times 10^{-2}$
<i>UO_2 (UK₂)^b</i>	$1,4 \times 10^{-02}$	$2,9 \times 10^{-3}$	$2,3 \times 10^{-3}$	$3,3 \times 10^{-03}$	$6,3 \times 10^{-3}$
<i>Ingestão composto insolúvel</i>	$4,5 \times 10^{-03}$	$1,8 \times 10^{-4}$	$1,9 \times 10^{-4}$	$4,1 \times 10^{-04}$	$9,6 \times 10^{-4}$

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003)

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansorbolo e col., 2002.

B.12- Caso 14 Avaliação do trabalhador 276

a) Descrição do caso:

Período de Exposição: 200 dias

Data de coleta: 07/08/02 - Equivale a 201 dias após o início da exposição crônica e coleta da amostra 1 dia após o término da exposição.

Para esse trabalhador a atividade de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina: fezes experimental estão apresentadas na Tabela B.12.1

Tabela B.12.1 – Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 276, amostras coletadas em 07/08/02

Código do trabalhador	Função	Dias após o início da operação ^a	Fezes mBq/dia	Urina mBq/dia	Urina:Fezes Líquida ^b
276	<i>peneiramento</i>	201	12	0,04	$3,3 \times 10^{-03}$

^a data da coleta das amostras de excreta

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes.

b) Hipóteses Testadas:

Hipótese 1: Exposição Crônica via inalação e ingestão durante o período de produção

Considera-se que as amostras de fezes e urina foram coletadas 1 dias após a exposição crônica de 200 dias. As razões urina:fezes teóricas para os diferentes tipos de “solubilidade”, $1\mu\text{m}$ o diâmetro aerodinâmico da partícula inalada (DAMA), estão apresentadas na Tabela B.12.2. Comparando-se as razões urina:fezes experimental $3,3 \times 10^{-3}$, com as razões teóricas apresentadas na Tabela B.12.2, observa-se que a razão urina:fezes experimental está próxima do valor de razão urina:fezes teórica para ingestão, $1,2 \times 10^{-3}$. Uma razão que leva a aceitar a hipótese de ingestão, como via de incorporação, é que este trabalhador foi exposto no ambiente trabalho, uma vez que a razão isotópica $^{238}\text{U}/^{234}\text{U}$ é 0,4 menor que 0,6 critério utilizado para caracterizar exposição ocupacional. A atividade de ^{238}U encontrada na urina foi 0,04 mBq/dia, valor inferior aos valores de atividade ^{238}U dos outros trabalhadores. Este trabalhador, em especial, é quem apresenta maior risco para exposição interna na fábrica, por esta razão usa todo o equipamento de proteção física (máscara panorâmica) quando está desempenhando a tarefa de peneiramento. A ingestão pode ocorrer quando na retirada da máscara facial. A razão experimental está mais perto da crônica tipo S do que da ingestão. Pode até ser uma mistura dos dois.

Tabela B.12.2 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 200 dias de compostos tipo F, M, S e UO₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão e amostra coletada depois de 1 dia.

Tipo de Simulação	Urina	Fezes	Razão
<i>Tipo F</i>	1,0x10 ⁻¹	9,5x10 ⁻²	1,1x10 ⁰
<i>Tipo M</i>	5,7x10 ⁻²	2,3x10 ⁻¹	2,4x10 ⁻¹
<i>Tipo S</i>	1,9x10 ⁻³	2,6x10 ⁻¹	7,2x10 ⁻³
<i>ICRP 2003^a</i>	2,5x10 ⁻²	2,5x10 ⁻¹	9,8x10 ⁻²
<i>UO₂ (UK)^b</i>	9,5x10 ⁻³	2,6x10 ⁻¹	3,7x10 ⁻²
<i>UO₂(F)^c</i>	1,3x10 ⁻²	2,6x10 ⁻¹	5,2x10 ⁻²
<i>UO₂(UK₂)^b</i>	4,9x10 ⁻³	2,6x10 ⁻¹	1,9x10 ⁻²
<i>Ingestão composto insolúvel</i>	1,1x10 ⁻³	9,0x10 ⁻¹	1,2x10 ⁻³

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003)

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansbolo e col., 2002

Hipótese 2: Exposição de curta duração, via inalação, com incorporação substancialmente superior à incorporação crônica diária que o trabalhador poderia ter durante os 200 dias.

Para este cenário simulou-se a incorporação única de UO₂, considerando as diferentes solubilidades. As razões urina:fezes teóricas estão apresentadas na Tabela B12.3..

Tabela B.12.3 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando-se incorporação de curta duração

Incorporação	Urina/fezes 1º dia	Urina/fezes 2º dia	Urina/fezes 3º dia	Urina/fezes 4º dia	Urina/fezes 5º dia
<i>Tipo M</i>	$3,3 \times 10^{-01}$	$1,3 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^{-2}$	$4,5 \times 10^{-02}$	$1,0 \times 10^{-2}$
<i>Tipo S</i>	$7,2 \times 10^{-03}$	$3,9 \times 10^{-4}$	$4,9 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-03}$	$2,3 \times 10^{-3}$
<i>Inalação ICRP 2003^a</i>	$7,5 \times 10^{-02}$	$1,1 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-02}$	$3,3 \times 10^{-2}$
UO_2 (UK) ^b	$1,3 \times 10^{-02}$	$3,4 \times 10^{-3}$	$3,5 \times 10^{-3}$	$5,5 \times 10^{-03}$	$1,1 \times 10^{-2}$
UO_2 UO_2 (F) ^c	$2,3 \times 10^{-02}$	$5,9 \times 10^{-3}$	$4,9 \times 10^{-3}$	$7,4 \times 10^{-03}$	$1,5 \times 10^{-2}$
UO_2 (UK ₂) ^b	$1,4 \times 10^{-02}$	$2,9 \times 10^{-3}$	$2,3 \times 10^{-3}$	$3,3 \times 10^{-03}$	$6,3 \times 10^{-3}$
<i>Ingestão composto insolúvel</i>	$4,5 \times 10^{-03}$	$1,8 \times 10^{-4}$	$1,9 \times 10^{-4}$	$4,1 \times 10^{-04}$	$9,6 \times 10^{-4}$

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003)

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansbololo e col., 2002.

Ao testar a hipótese de uma exposição eventual, é muito difícil definir o composto a que o trabalhador está exposto. Várias hipóteses podem ser assumidas:

- incorporação de um composto tipo S o 1, 4 ou 5 dias antes da coleta das amostras
- incorporação de um composto tipo UO_2 (UK) 2 a 4 dias antes da coleta das amostras
- incorporação de um composto tipo UO_2 (F) 2 a 4 dias antes da coleta das amostras
- incorporação de um composto tipo UO_2 (UK₂) 2 a 5 dias antes da coleta das amostras

B.13- Caso 15 Avaliação do trabalhador 276 em 2003

a) Descrição do caso:

Data de coleta: 16/03/03 - Equivale a 85 dias após o início da exposição crônica e coleta da amostra 1 dia após o término da exposição.

O Caso 15 refere-se à coleta de amostras de urina e fezes do Trabalhador 276, realizada em 16 de março de 2003. Essas análises fazem parte do trabalho realizado por Xavier, que analisou fezes e urina de diversos trabalhadores em diferentes funções (Xavier, 2005). Esse trabalhador esteve exposto durante 84 dias, a coleta das amostras foi realizada no dia seguinte após o término da exposição.

Para esse trabalhador a atividade de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina: fezes experimental estão apresentadas na Tabela B.13.1.

Tabela B.13.1 – Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 276, amostras coletadas em 16/03/03

Código do trabalhador	Função	Dias após o início da operação ^a	^{238}U		
			Fezes mBq/dia	Urina mBq/dia	Urina:Fezes Líquida ^b
276	<i>peneiramento</i>	85	12	0,17	$1,4 \times 10^{-02}$

^a data da coleta das amostras de excreta

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes.

b) Hipóteses Testadas:

Hipótese 1: Exposição Crônica via inalação e ingestão durante o período de produção

Considera-se que as amostras de fezes e urina foram coletadas 1 dia após a exposição crônica de 85 dias. As razões urina:fezes teóricas para os diferentes tipos de “solubilidade”, $1\mu\text{m}$ o diâmetro aerodinâmico da partícula inalada (DAMA), estão apresentadas na Tabela B.13.2. Comparando-se as razões urina:fezes experimental, $1,4 \times 10^{-2}$, com as razões teóricas apresentadas na Tabela B.13.2, observa-se que a razão urina:fezes experimental está próxima do valor de razão urina:fezes teórica para inalação de UO_2 , designado como $\text{UO}_2 (\text{UK}_2)$ na Tabela B.13.2, $1,2 \times 10^{-2}$. A atividade de ^{238}U encontrada na urina foi 0,3 mBq/dia, valor 7 vezes superior ao valor de atividade ^{238}U nas

amostras de urina em agosto de 2002, onde foi caracterizada a ingestão como via de incorporação. Este trabalhador, em especial, é quem apresenta maior risco para exposição interna na fábrica, por esta razão usa todo o equipamento de proteção física (máscara panorâmica) quando está desempenhando a tarefa de peneiramento.

Tabela B.13.2 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 85 dias de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão e amostra coletada depois de 1 dia.

Tipo de Simulação	Urina	Fezes	Razão
<i>Tipo F</i>	$9,6 \times 10^{-2}$	$9,5 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^0$
<i>Tipo M</i>	$3,8 \times 10^{-2}$	$2,2 \times 10^{-1}$	$1,7 \times 10^{-1}$
<i>Tipo S</i>	$1,1 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-1}$	$4,4 \times 10^{-3}$
<i>ICRP 2003^a</i>	$1,5 \times 10^{-2}$	$2,4 \times 10^{-1}$	$6,3 \times 10^{-2}$
<i>UO_2 (UK)^b</i>	$5,3 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-1}$	$2,1 \times 10^{-2}$
<i>UO_2(F)^c</i>	$7,7 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-1}$	$3,1 \times 10^{-2}$
<i>UO_2(UK₂)^b</i>	$3,0 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-1}$	$1,2 \times 10^{-2}$
<i>Ingestão composto insolúvel</i>	$1,0 \times 10^{-3}$	$9,0 \times 10^{-1}$	$1,1 \times 10^{-3}$

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003)

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansbolo e col., 2002.

Hipótese 2: Exposição de curta duração, via inalação, com incorporação substancialmente superior à incorporação crônica diária que o trabalhador poderia ter durante os 200 dias.

Neste caso, simulou-se a incorporação única de UO_2 , considerando as diferentes solubilidades. As razões urina:fezes teóricas estão apresentadas na Tabela B.13.3. Comparando-se a razão urina:fezes experimental com as razões derivadas a partir dos modelos teóricos, observa-se que é muito difícil definir o composto a que o trabalhador está exposto. Várias hipóteses podem ser assumidas:

- incorporação de um composto tipo UO_2 (ICRP 2003) 2 a 5 dias antes da coleta das amostras
- incorporação de um composto tipo $UO_2(UK)$ 1 ou 5 dias antes da coleta das amostras
- incorporação de um composto tipo $UO_2(F)$ 1 ou 5 dias antes da coleta das amostras
- incorporação de um composto tipo $UO_2(UK_2)$ 1 dia antes da coleta das amostras

Tabela B.13.3 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando-se incorporação de curta duração

Incorporação	Urina/fezes 1º dia	Urina/fezes 2º dia	Urina/fezes 3º dia	Urina/fezes 4º dia	Urina/fezes 5º dia
<i>Tipo M</i>	$3,3 \times 10^{-01}$	$1,3 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^{-2}$	$4,5 \times 10^{-02}$	$1,0 \times 10^{-1}$
<i>Tipo S</i>	$7,2 \times 10^{-03}$	$3,9 \times 10^{-4}$	$4,9 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-03}$	$2,3 \times 10^{-3}$
<i>UO_2 ICRP 2003^a</i>	$7,5 \times 10^{-02}$	$1,1 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-02}$	$3,3 \times 10^{-2}$
<i>$UO_2(UK)$^b</i>	$1,3 \times 10^{-02}$	$3,4 \times 10^{-3}$	$3,5 \times 10^{-3}$	$5,5 \times 10^{-03}$	$1,1 \times 10^{-2}$
<i>$UO_2(F)$^c</i>	$2,3 \times 10^{-02}$	$5,9 \times 10^{-3}$	$4,9 \times 10^{-3}$	$7,4 \times 10^{-03}$	$1,5 \times 10^{-2}$
<i>$UO_2(UK_2)$^b</i>	$1,4 \times 10^{-02}$	$2,9 \times 10^{-3}$	$2,3 \times 10^{-3}$	$3,3 \times 10^{-03}$	$6,3 \times 10^{-3}$
<i>Ingestão composto insolúvel</i>	$4,5 \times 10^{-03}$	$1,8 \times 10^{-4}$	$1,9 \times 10^{-4}$	$4,1 \times 10^{-04}$	$9,6 \times 10^{-4}$

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003)

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansbolo e col., 2002

B.14- Caso 16 Avaliação do trabalhador 236

a) Descrição do caso:

Período de Exposição:

Data de coleta: 01/05/02 - Equivale a 112 dias após o início da exposição crônica de 111 dias, ou coleta da amostra 1 dia após o término da exposição.

Para esse trabalhador a atividade de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina: fezes experimental estão apresentadas na Tabela B.14.1

Tabela B.14.1 – Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 236, amostras coletadas em 01/05/02

Código do trabalhador	Função	Dias após o início da operação ^a	^{238}U		
			Fezes mBq/dia	Urina mBq/dia	Urina:Fezes Líquida ^b
236	<i>leito fluidizado</i>	112	240	0,84	$3,5 \times 10^{-3}$

^a data da coleta das amostras de excreta

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes..

b) Hipóteses Testadas

Hipótese 1: Exposição Crônica via inalação e ingestão durante o período de produção

Considera-se que as amostras de fezes e urina foram coletadas 112 dias após a exposição crônica de 111 dias. As razões urina:fezes teóricas para os diferentes tipos de “solubilidade”, $1\mu\text{m}$ o diâmetro aerodinâmico mediano da partícula inalada (DAMA), estão apresentadas na Tabela B.14.2. Comparando-se as razões urina:fezes experimental, $3,5 \times 10^{-3}$, com as razões teóricas apresentadas na Tabela B.14.2, observa-se que a razão urina:fezes experimental está próxima do valor de razão urina:fezes teórica para ingestão de UO_2 , $1,2 \times 10^{-3}$ e também para inalação de compostos Tipo S ($5,8 \times 10^{-3}$). No entanto, sabe-se que este trabalhador pode estar exposto a compostos de diferentes solubilidades, uma vez que passa maior parte de seu tempo em um ambiente com maior probabilidade de exposição a compostos solúveis. No momento que vai desempenhar suas tarefas no leito fluidizado, onde manipula o urânio na forma de UO_2 , usa-se a máscara panorâmica, pois o risco de incorporação é muito alto. A atividade de ^{238}U encontrada na sua urina é 0,84

mBq/dia, valor mais elevado que os apresentados para os trabalhadores expostos a UO_2 , alocados nos setores relacionados à produção de pastilha e da Unidade 1, indicando uma incorporação de compostos solúveis. Portanto, o valor elevado de ^{238}U nas fezes deste trabalhador (240 mBq/dia) pode ser atribuído à ingestão recente, e está levando a uma redução da razão urina:fezes. A ingestão pode ocorrer durante a retirada da máscara panorâmica.

Tabela B.14.2 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 111 dias de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão e amostra coletada no dia seguinte

Tipo de Simulação	Urina	Fezes	Razão
<i>Tipo F</i>	$9,8 \times 10^{-2}$	$9,5 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{00}$
<i>Tipo M</i>	$4,4 \times 10^{-2}$	$2,3 \times 10^{-1}$	$1,9 \times 10^{-1}$
<i>Tipo S</i>	$1,3 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-1}$	$5,8 \times 10^{-3}$
<i>ICRP 2003^a</i>	$6,0 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-1}$	$2,4 \times 10^{-2}$
<i>UO_2 (UK)^b</i>	$6,4 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-1}$	$2,5 \times 10^{-2}$
<i>UO_2(F)^c</i>	$9,2 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-1}$	$3,6 \times 10^{-2}$
<i>UO_2(UK₂)^b</i>	$3,4 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-1}$	$1,4 \times 10^{-2}$
<i>Ingestão composto insolúvel</i>	$1,1 \times 10^{-3}$	$9,0 \times 10^{-1}$	$1,2 \times 10^{-3}$
<i>Ingestão composto solúvel</i>	$5,4 \times 10^{-2}$	$3,1 \times 10^{+0}$	$1,7 \times 10^{-2}$

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003)

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansbolob e col., 2002. e Stradling e col., 2002

Hipótese 2: Exposição de curta duração, via inalação, com incorporação substancialmente superior à incorporação crônica diária que o trabalhador poderia ter durante os 111 dias.

Neste caso, simulou-se a incorporação única de UO_2 , considerando as diferentes solubilidades. As razões urina:fezes teóricas estão apresentadas na Tabela B.14.3, assumindo-se que a amostra foi coletada até cinco dias após à exposição.

Tabela B.14.3 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando-se incorporação de curta duração

Incorporação	Urina/fezes 1º dia	Urina/fezes 2º dia	Urina/fezes 3º dia	Urina/fezes 4º dia	Urina/fezes 5º dia
<i>Tipo F</i>	$5,3 \times 10^{+0}$	$1,3 \times 10^{-1}$	$2,1 \times 10^{-1}$	$4,5 \times 10^{-1}$	$1,1 \times 10^{+0}$
<i>Tipo M</i>	$3,3 \times 10^{-01}$	$1,3 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^{-2}$	$4,5 \times 10^{-02}$	$1,0 \times 10^{-1}$
<i>Tipo S</i>	$7,2 \times 10^{-03}$	$3,9 \times 10^{-4}$	$4,9 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-03}$	$2,3 \times 10^{-3}$
<i>UO_2 ICRP 2003^a</i>	$7,5 \times 10^{-02}$	$1,1 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-02}$	$3,3 \times 10^{-2}$
<i>UO_2 (UK)^b</i>	$1,3 \times 10^{-02}$	$3,4 \times 10^{-3}$	$3,5 \times 10^{-3}$	$5,5 \times 10^{-03}$	$1,1 \times 10^{-2}$
<i>UO_2(F)^c</i>	$2,3 \times 10^{-02}$	$5,9 \times 10^{-3}$	$4,9 \times 10^{-3}$	$7,4 \times 10^{-03}$	$1,5 \times 10^{-2}$
<i>UO_2(UK₂)^b</i>	$1,4 \times 10^{-02}$	$2,9 \times 10^{-3}$	$2,3 \times 10^{-3}$	$3,3 \times 10^{-03}$	$6,3 \times 10^{-3}$
<i>Ingestão composto insolúvel</i>	$4,5 \times 10^{-03}$	$1,8 \times 10^{-4}$	$1,9 \times 10^{-4}$	$4,1 \times 10^{-04}$	$9,6 \times 10^{-4}$
<i>Ingestão composto solúvel</i>	$4,6 \times 10^{-02}$	$1,8 \times 10^{-3}$	$1,9 \times 10^{-3}$	$4,1 \times 10^{-03}$	$9,6 \times 10^{-3}$

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003))

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansbololo e col., 2002.

Comparando-se as razões urina:fezes experimental com as razões derivadas a partir dos modelos teóricos, várias hipóteses podem ser assumidas:

- incorporação por inalação de um composto tipo S 5 dias antes da coleta das amostras

- incorporação por inalação de um composto tipo $UO_2(UK)$ 2 ou 3 dias antes da coleta das amostras
- incorporação por inalação de um composto tipo $UO_2(UK_2)$ 2 ou 4 dias antes da coleta das amostras
- incorporação por ingestão de um composto solúvel 4 dias antes da coleta das amostras

B.15- Caso 17 Avaliação do trabalhador 224

a) Descrição do caso:

Período de Exposição: 122 dias

Data de coleta: 15/05/02 - Equivale a 123 dias após o início da exposição crônica de 122 dias, ou coleta da amostra 1 dia após o término da exposição.

Para este trabalhador a atividade de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental estão apresentadas nas Tabela B.15.1.

Tabela B.15.1 – Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 224, amostras coletadas em 15/05/02

Código do trabalhador	Função	Dias após o início da operação ^a	^{238}U		
			Fezes mBq/dia	Urina mBq/dia	Urina:Fezes líquida ^b
224	Leito fluidizado	123	33,4	1,6	$4,8 \times 10^{-02}$

^a data da coleta das amostras de excreta

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes.

b) Hipóteses Testadas:

Hipótese 1: Exposição Crônica via inalação e ingestão durante o período de produção

Considera-se que as amostras de fezes e urina foram coletadas 123 dias após a exposição crônica de 122 dias. As razões urina:fezes teóricas para os diferentes tipos de “solubilidade”, $1\mu m$ o diâmetro aerodinâmico mediano da partícula inalada (DAMA), estão apresentadas na Tabela B.15.2.

Comparando-se as razões urina:fezes experimental, $4,8 \times 10^{-2}$, com as razões teóricas apresentadas na Tabela B.15.2, observa-se que a razão urina:fezes experimental está próxima dos valores de razão urina:fezes teórica para inalação de $UO_2(UK)$, $UO_2(UK_2)$ e ICRP 2003 pelo valores entre $1,4 \times 10^{-2}$ e $7,6 \times 10^{-2}$. A razão experimental está próxima da razão teórica de ingestão de compostos solúveis. As funções desempenhadas por este trabalhador são as mesmas do caso 16. Sabe-se que este trabalhador pode estar exposto a compostos de diferentes solubilidades, uma vez que passa maior parte de seu tempo em um ambiente com maior probabilidade de exposição a compostos solúveis. No momento que vai desempenhar suas tarefas no leito fluidizado, onde manipula o urânio na forma de UO_2 , usa máscara panorâmica, pois o risco de incorporação é muito alto. A atividade de ^{238}U encontrada na sua urina é 1,6 mBq/dia, valor mais elevado que os apresentados para os trabalhadores expostos a UO_2 , alocados nos setores relacionados à produção de pastilha e Unidade 1 indicando uma incorporação de compostos solúveis. É possível que este trabalhador esteja exposto a uma mistura de compostos: compostos solúveis, presentes no ambiente de trabalho, e UO_2 devido ao uso errado da máscara panorâmica.

Tabela B.15.2 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 122 dias de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão e amostra coletada no dia seguinte

Tipo de Simulação	Urina	Fezes	Razão
<i>Tipo F</i>	$9,9 \times 10^{-2}$	$9,5 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^0$
<i>Tipo M</i>	$4,6 \times 10^{-02}$	$2,3 \times 10^{-1}$	$2,0 \times 10^{-1}$
<i>Tipo S</i>	$1,4 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-1}$	$5,4 \times 10^{-3}$
<i>ICRP 2003^a</i>	$1,9 \times 10^{-2}$	$2,5 \times 10^{-1}$	$7,6 \times 10^{-2}$
<i>$UO_2(UK)^b$</i>	$6,8 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-1}$	$2,7 \times 10^{-2}$
<i>$UO_2(F)^c$</i>	$9,7 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-1}$	$3,9 \times 10^{-2}$
<i>$UO_2(UK_2)^b$</i>	$3,6 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-1}$	$1,4 \times 10^{-2}$
<i>Ingestão composto insolúvel</i>	$1,1 \times 10^{-3}$	$9,0 \times 10^{-1}$	$1,2 \times 10^{-3}$
<i>Ingestão composto solúvel</i>	$1,1 \times 10^{-2}$	$8,9 \times 10^{-1}$	$1,2 \times 10^{-2}$

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003)

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansbolo e col., 2002.

Hipótese 2: Exposição de curta duração, via inalação, com incorporação substancialmente superior à incorporação crônica diária que o trabalhador poderia ter durante os 122 dias.

Simulou-se a incorporação única de UO_2 , considerando as diferentes solubilidades. As razões urina:fezes teóricas estão apresentadas na Tabela B.15.3.

Tabela B.15.3 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando-se incorporação de curta duração

Incorporação	Urina/fezes 1º dia	Urina/fezes 2º dia	Urina/fezes 3º dia	Urina/fezes 4º dia	Urina/fezes 5º dia
Tipo F	$5,3 \times 10^{+0}$	$1,3 \times 10^{-1}$	$2,1 \times 10^{-1}$	$4,5 \times 10^{-1}$	$1,1 \times 10^{+0}$
<i>Tipo M</i>	$3,3 \times 10^{-01}$	$1,3 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^{-2}$	$4,5 \times 10^{-02}$	$1,0 \times 10^{-1}$
<i>Tipo S</i>	$7,2 \times 10^{-03}$	$3,9 \times 10^{-4}$	$4,9 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-03}$	$2,3 \times 10^{-3}$
<i>UO_2 ICRP 2003^a</i>	$7,5 \times 10^{-02}$	$1,1 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-02}$	$3,3 \times 10^{-2}$
<i>UO_2 (UK)^b</i>	$1,3 \times 10^{-02}$	$3,4 \times 10^{-3}$	$3,5 \times 10^{-3}$	$5,5 \times 10^{-03}$	$1,1 \times 10^{-2}$
<i>UO_2 (F)^c</i>	$2,3 \times 10^{-02}$	$5,9 \times 10^{-3}$	$4,9 \times 10^{-3}$	$7,4 \times 10^{-03}$	$1,5 \times 10^{-2}$
<i>UO_2 (UK₂)^b</i>	$1,4 \times 10^{-02}$	$2,9 \times 10^{-3}$	$2,3 \times 10^{-3}$	$3,3 \times 10^{-03}$	$6,3 \times 10^{-3}$
<i>Ingestão composto insolúvel</i>	$4,5 \times 10^{-03}$	$1,8 \times 10^{-4}$	$1,9 \times 10^{-4}$	$4,1 \times 10^{-04}$	$9,6 \times 10^{-4}$
<i>Ingestão composto solúvel</i>	$4,6 \times 10^{-02}$	$1,8 \times 10^{-3}$	$1,9 \times 10^{-3}$	$4,1 \times 10^{-03}$	$9,6 \times 10^{-3}$

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003))

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansbolo e col., 2002

Comparando-se a razão urina:fezes experimental com as razões derivadas a partir dos modelos teóricos, observa-se que é compatível com a incorporação de compostos tipo $UO_2(UK)$, $UO_2(F)$, $UO_2(UK_2)$ e UO_2 ICRP 2003. Várias hipóteses podem ser assumidas:

- incorporação por inalação de um composto tipo UO_2 (ICRP 2003) 5 dias antes da coleta das amostras
- incorporação por inalação de um composto tipo $UO_2(UK)$, $UO_2(F)$, $UO_2(UK_2)$ e UO_2 ICRP 2003 1 dia antes da coleta da amostra
- incorporação por inalação de um composto tipo M 4 dias antes da coleta da amostra
- incorporação por ingestão de um composto solúvel 1 dia antes da coleta das amostras

B.16- Caso 18 Avaliação do trabalhador 227

a) Descrição do caso:

Período de Exposição: 111 dias

Data de coleta: 01/05/02 - Equivale a 112 dias após o início da exposição crônica de 111 dias, ou coleta da amostra 1 dia após o término da exposição.

Para este trabalhador a atividade de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental estão apresentadas nas Tabela B.16.1. A metodologia de avaliação da via de incorporação foi a mesma utilizada anteriormente.

Tabela B.16.1 – Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 227, amostras coletadas em 01/05/02

Código do trabalhador	Função	Dias após o início da operação ^a	^{238}U		
			Fezes mBq/dia	Urina mBq/dia	Urina:Fezes Líquida ^b
227	<i>leito fluidizado</i>	112	33,3	0,7	$2,0 \times 10^{-02}$

^a data da coleta das amostras de excreta

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes.

b) Hipóteses Testadas:

Hipótese 1: Exposição Crônica via inalação e ingestão durante o período de produção

As amostras de fezes e urina foram coletadas 112 dias após a exposição crônica de 111 dias. As razões urina:fezes teóricas para os diferentes tipos de “solubilidade”, $1\mu\text{m}$ o diâmetro aerodinâmico mediano da partícula inalada (DAMA), estão apresentadas na Tabela B.16.2. Comparando-se as razões urina:fezes experimental, $2,0 \times 10^{-2}$, com as razões teóricas apresentadas na Tabela B.16.2, observa-se que a razão urina:fezes experimental está próxima dos valores das razões urina:fezes teóricas para inalação de compostos de $\text{UO}_2(\text{UK})$, $\text{UO}_2(\text{F})$, $\text{UO}_2(\text{UK}_2)$ e UO_2 ICRP 2003 que são valores entre $1,4 \times 10^{-2}$ e $3,6 \times 10^{-2}$. A razão experimental também está próxima da razão teórica para ingestão de compostos solúveis. As funções desempenhadas por este trabalhador são as mesmas dos casos 16 e 17. Sabe-se que este trabalhador pode estar exposto a compostos de diferentes solubilidades, uma vez que passa maior parte de seu tempo em um ambiente com maior probabilidade de exposição a compostos solúveis. No momento que vai desempenhar suas tarefas no leito fluidizado, onde manipula o urânio na forma de UO_2 , usa máscara panorâmica, pois o risco de incorporação é muito alto. A atividade de ^{238}U encontrada na sua urina é $0,7$ mBq/dia, valor mais elevado que os apresentados para os trabalhadores expostos a UO_2 , alocados nos setores relacionados à produção de pastilha e Unidade 1, indicando uma incorporação de compostos solúveis. É possível que este trabalhador esteja exposto a uma mistura de compostos. Compostos solúveis, presentes no ambiente de trabalho, e UO_2 devido ao uso errado da máscara panorâmica.

Tabela B.16.2 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 111 dias de compostos tipo F, M, S e UO₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão e amostra coletada no dia seguinte

Tipo de Simulação	Urina	Fezes	Razão
<i>Tipo F</i>	9,8x10 ⁻²	9,5x10 ⁻²	1,0x10 ⁰
<i>Tipo M</i>	4,4x10 ⁻²	2,3x10 ⁻¹	1,9x10 ⁻¹
<i>Tipo S</i>	1,3x10 ⁻³	2,5x10 ⁻¹	5,8x10 ⁻³
<i>ICRP 2003^a</i>	6,0x10 ⁻³	2,5x10 ⁻¹	2,4x10 ⁻²
<i>UO₂ (UK)^b</i>	6,4x10 ⁻³	2,5x10 ⁻¹	2,5x10 ⁻²
<i>UO₂(F)^c</i>	9,2x10 ⁻³	2,5x10 ⁻¹	3,6x10 ⁻²
<i>UO₂(UK₂)^b</i>	3,4x10 ⁻³	2,5x10 ⁻¹	1,4x10 ⁻²
<i>Ingestão composto insolúvel</i>	1,1x10 ⁻³	9,0x10 ⁻¹	1,2x10 ⁻³
<i>Ingestão composto solúvel</i>	5,4x10 ⁻²	3,1x10 ⁺⁰	1,7x10 ⁻²

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003)

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansorbolo e col., 2002.

Hipótese 2: Exposição de curta duração, via inalação, com incorporação substancialmente superior à incorporação crônica diária que o trabalhador poderia ter durante os 122 dias.

Simulou-se a incorporação única de UO₂, considerando as diferentes solubilidades. As razões urina:fezes teóricas estão apresentadas na Tabela B.16.3, assumindo-se que a amostra foi coletada no dia seguinte até 5 dias após à exposição. UO₂.

Tabela B.16.3 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando-se incorporação de curta duração

Incorporação	Urina/fezes 1º dia	Urina/fezes 2º dia	Urina/fezes 3º dia	Urina/fezes 4º dia	Urina/fezes 5º dia
Tipo F	$5,3 \times 10^{+0}$	$1,3 \times 10^{-1}$	$2,1 \times 10^{-1}$	$4,5 \times 10^{-1}$	$1,1 \times 10^{+0}$
<i>Tipo M</i>	$3,3 \times 10^{-01}$	$1,3 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^{-2}$	$4,5 \times 10^{-02}$	$1,0 \times 10^{-1}$
<i>Tipo S</i>	$7,2 \times 10^{-03}$	$3,9 \times 10^{-4}$	$4,9 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-03}$	$2,3 \times 10^{-3}$
<i>UO₂ ICRP 2003^a</i>	$7,5 \times 10^{-02}$	$1,1 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-02}$	$3,3 \times 10^{-2}$
<i>UO₂ (UK)^b</i>	$1,3 \times 10^{-02}$	$3,4 \times 10^{-3}$	$3,5 \times 10^{-3}$	$5,5 \times 10^{-03}$	$1,1 \times 10^{-2}$
<i>UO₂(F)^c</i>	$2,3 \times 10^{-02}$	$5,9 \times 10^{-3}$	$4,9 \times 10^{-3}$	$7,4 \times 10^{-03}$	$1,5 \times 10^{-2}$
<i>UO₂(UK₂)^b</i>	$1,4 \times 10^{-02}$	$2,9 \times 10^{-3}$	$2,3 \times 10^{-3}$	$3,3 \times 10^{-03}$	$6,3 \times 10^{-3}$
<i>Ingestão composto insolúvel</i>	$4,5 \times 10^{-03}$	$1,8 \times 10^{-4}$	$1,9 \times 10^{-4}$	$4,1 \times 10^{-04}$	$9,6 \times 10^{-4}$
<i>Ingestão composto solúvel</i>	$4,6 \times 10^{-02}$	$1,8 \times 10^{-3}$	$1,9 \times 10^{-3}$	$4,1 \times 10^{-03}$	$9,6 \times 10^{-3}$

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003)

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansbololo e col., 2002

Comparando-se a razão urina:fezes experimental com as razões derivadas a partir dos modelos teóricos, observa-se que é compatível com a incorporação de compostos tipo $UO_2(UK)$, $UO_2(F)$, $UO_2(UK_2)$ e UO_2 ICRP 2003. Várias hipóteses podem ser assumidas:

- incorporação por inalação de um composto tipo $UO_2(UK)$, $UO_2(F)$, $UO_2(UK_2)$ e UO_2 ICRP 2003 1 e 5 dias antes da coleta das amostras
- incorporação por inalação de um composto tipo M 3 dias antes da coleta das amostras
- incorporação por ingestão de um composto solúvel 1 dia antes da coleta das amostras

B.17- Caso 19 Avaliação do trabalhador 257

a) Descrição do caso:

Período de Exposição: 218 dias

Data de coleta: 16/08/02 - Equivale a 219 dias após o início da exposição crônica de 218 dias, ou coleta da amostra 1 dias após o término da exposição.

Para este trabalhador as atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental estão apresentadas nas Tabela B.17.1.

Tabela B.17.1 – Atividades de ^{238}U nas amostras de urina e fezes e razão urina:fezes experimental do trabalhador 227, amostras coletadas em 16/08/02

Código do trabalhador	Função	Dias após o início da operação ^a	^{238}U		
			Fezes mBq/dia	Urina mBq/dia	Urina:Fezes líquido ^b
257	precipitação	219	69,7	3,1	$4,4 \times 10^{-02}$

^a data da coleta das amostras de excreta

^b desconto da contribuição ambiental nas amostras de urina e fezes. .

b) Hipóteses Testadas:

Hipótese 1: Exposição Crônica via inalação e ingestão durante o período de produção

Considera-se que as amostras de fezes e urina foram coletadas 219 dias após a exposição crônica de 218 dias. As razões urina:fezes teóricas para os diferentes tipos de “solubilidade”, $1\mu\text{m}$ o diâmetro aerodinâmico mediano da partícula inalada (DAMA), estão apresentadas na Tabela B.17.2 Comparando-se a razão urina:fezes experimental, $4,4 \times 10^{-2}$, com as razões teóricas apresentadas na Tabela B.17.2, observa-se que a razão urina:fezes experimental está próxima dos valores de razão urina:fezes teórica para inalação de compostos de $\text{UO}_2(\text{UK})$, $\text{UO}_2(\text{F})$ e $\text{UO}_2(\text{UK}_2)$, , com valores entre $2,0 \times 10^{-2}$ e $5,5 \times 10^{-2}$. A razão experimental também está próxima da razão teórica para ingestão de compostos solúveis. Este trabalhador está envolvido na precipitação do UF_6 , composto caracterizado como solúvel. No entanto, passa maior parte de seu tempo em um ambiente onde pode haver exposição a TCAU e UO_3 ou mesmo UO_2 . A atividade de ^{238}U encontrada na sua urina é 3,0 mBq/dia, valor mais elevado que os apresentados para os

trabalhadores expostos a UO₂, alocados nos setores relacionados à produção de e Unidade 1 indicando uma incorporação de compostos solúveis..

Tabela B.17.2 - Frações teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação contínua durante 218 dias de compostos tipo F, M, S e UO₂ com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão e amostra coletada no dia seguinte

Tipo de Simulação	Urina	Fezes	Razão
<i>Tipo F</i>	1,0x10 ⁻¹	9,5x10 ⁻²	1,1x10 ⁰
<i>Tipo M</i>	5,9x10 ⁻⁰²	2,3x10 ⁻¹	2,5x10 ⁻¹
<i>Tipo S</i>	2,0x10 ⁻³	2,6x10 ⁻¹	7,6x10 ⁻³
<i>ICRP 2003^a</i>	2,6x10 ⁻²	2,5x10 ⁻¹	1,0x10 ⁻¹
<i>UO₂ (UK)^b</i>	1,0x10 ⁻²	2,6x10 ⁻¹	3,9x10 ⁻²
<i>UO₂(F)^c</i>	1,4x10 ⁻²	2,6x10 ⁻¹	5,5x10 ⁻²
<i>UO₂(UK₂)^b</i>	5,2x10 ⁻³	2,6x10 ⁻¹	2,0x10 ⁻²
<i>Ingestão composto insolúvel</i>	1,1x10 ⁻³	9,0x10 ⁻¹	1,2x10 ⁻³
<i>Ingestão composto solúvel</i>	1.87x10 ⁻⁰²	9.80x10 ⁻⁰¹	1.91x10 ⁻⁰²

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003)

^b Stradling e col., 2002. ^c Ansoy e col., 2002

Hipótese 2: Exposição de curta duração, via inalação, com incorporação substancialmente superior à incorporação crônica diária que o trabalhador poderia ter durante os 218 dias.

Simulou-se a incorporação única de urânio, considerando as diferentes solubilidades. As razões urina:fezes teóricas estão apresentadas na Tabela B.17.3 assumindo-se que a amostra foi coletada no dia seguinte até 5 dias após à exposição. Comparando-se a razão urina:fezes experimental com as razões derivadas a partir dos modelos teóricos, observa-se que a razão experimental aproxima-se mais da razão obtida pela simulação de incorporação de um composto tipo M, considerando que a amostra foi coletada no quarto dia. A razão experimental também está próxima da razão teórica da incorporação por ingestão de um composto solúvel 1 dia antes da coleta das amostras

Tabela B.17.3 - Frações Teóricas de urânio nas fezes e urina a partir da simulação da incorporação de compostos tipo F, M, S e UO_2 com diferentes parâmetros de absorção do trato respiratório e incorporação via ingestão considerando-se incorporação de curta duração

Incorporação	Urina/fezes 1º dia	Urina/fezes 2º dia	Urina/fezes 3º dia	Urina/fezes 4º dia	Urina/fezes 5º dia
Tipo F	$5,3 \times 10^{+00}$	$1,3 \times 10^{-1}$	$2,1 \times 10^{-1}$	$4,5 \times 10^{-1}$	$1,1 \times 10^{+00}$
<i>Tipo M</i>	$3,3 \times 10^{-01}$	$1,3 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^{-2}$	$4,5 \times 10^{-02}$	$1,0 \times 10^{-1}$
<i>Tipo S</i>	$7,2 \times 10^{-03}$	$3,9 \times 10^{-4}$	$4,9 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-03}$	$2,3 \times 10^{-3}$
<i>UO_2 ICRP 2003^a</i>	$7,5 \times 10^{-02}$	$1,1 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-02}$	$3,3 \times 10^{-2}$
<i>UO_2 (UK)^b</i>	$1,3 \times 10^{-02}$	$3,4 \times 10^{-3}$	$3,5 \times 10^{-3}$	$5,5 \times 10^{-03}$	$1,1 \times 10^{-2}$
<i>UO_2(F)^c</i>	$2,3 \times 10^{-02}$	$5,9 \times 10^{-3}$	$4,9 \times 10^{-3}$	$7,4 \times 10^{-03}$	$1,5 \times 10^{-2}$
<i>UO_2(UK₂)^b</i>	$1,4 \times 10^{-02}$	$2,9 \times 10^{-3}$	$2,3 \times 10^{-3}$	$3,3 \times 10^{-03}$	$6,3 \times 10^{-3}$
<i>Ingestão composto insolúvel</i>	$4,5 \times 10^{-03}$	$1,8 \times 10^{-4}$	$1,9 \times 10^{-4}$	$4,1 \times 10^{-04}$	$9,6 \times 10^{-4}$
<i>Ingestão composto solúvel</i>	$4,6 \times 10^{-02}$	$1,8 \times 10^{-3}$	$1,9 \times 10^{-3}$	$4,1 \times 10^{-03}$	$9,6 \times 10^{-3}$

^a específico para elemento combustível tipo MOX (mistura de 96% de óxido de urânio e 4% de óxido de plutônio (ICRP, 2003))

^b Stradling e col., 2002.

^c Ansbololo e col., 2002