



BR99H0124

INIS-BR--3720

Kenya Moore de Almeida Dias da Cunha

**CONTRIBUIÇÕES AO ESTUDO DA EXPOSIÇÃO
OCUPACIONAL AO TÓRIO NO BRASIL**

Tese submetida à Universidade Federal do Rio de Janeiro
visando a obtenção do Grau de Doutor em Ciências

30 - 20



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

R

**PAGES ARE MISSING IN THE
ORIGINAL DOCUMENT**

Pages 107 - 130

CENTRO DE CIÊNCIAS DA SAÚDE
INSTITUTO DE BIOFÍSICA CARLOS CHAGAS FILHO
1997

DIAS DA CUNHA, Kenya Moore de Almeida

Contribuições ao estudo da exposição ocupacional ao tório no Brasil.

Rio de Janeiro. UFRJ. IBCCF. 1997

XII, 1xxf.

Tese: Doutor em Ciências (Biofísica)

1. Tório 2. Impactador em cascata
3. MMAD 4. Aerossol 5. Teses

I. Universidade Federal do Rio de Janeiro - IBCCF

II. Título

Contribuições ao estudo da exposição ocupacional ao tório no Brasil

Kenya Moore de Almeida Dias da Cunha

Tese submetida à Universidade Federal do Rio de Janeiro
visando a obtenção do Grau de Doutor em Ciências

Rio de Janeiro, RJ, BRASIL
Maio de 1997.

A meus dois amores:
Diana, minha filha querida e
José Waldemar, meu marido.

Agradecimentos:

- *À dra. Joyce Landmann Lipsztein, pela orientação da tese, e principalmente pela amizade e confiança demonstrada no decorrer deste trabalho.*
- *Ao dr. Carlos Vieira Barros Leite PUC-RIO, pela orientação, apoio, amizade e confiança:*
- *Ao dr. Morton Lippmann (Universidade de Nova Iorque, EUA) com quem tive a grande honra de travar contato na minha vida profissional. Agradeço a ele pela oportunidade concedida:*
- *Ao dr. Chain Ping Fang (Universidade de Nova Iorque, EUA) agradeço pelo apoio, colaboração e discussões durante a calibração experimental do sexto estágio do impactador:*
- *Ao dr. Rex Nazaré Alves (Instituto Militar de Engenharia), pelo incentivo, amizade, apoio e confiança;*
- *Ao dr. Fernando Giovanni Bianchini, (CNEN) pelo incentivo, amizade, apoio e confiança;*
- *A Maisa Joppert Coelho e toda equipe do Departamento de Engenharia Nuclear do Instituto de Engenharia Nuclear (IME), agradeço a todos pela extrema cordialidade, colaboração e amizade:*
- *Ao João Hilário Javarone e Aluísio Castanho, pela colaboração durante a coleta de amostras, amizade e apoio recebidos;*
- *A dra. Adriana Teixeira Ramalho (IRD), pela constante e inestimável colaboração durante e sugestões para a composição do texto;*
- *A Adelaide Maria Gondin da Fonseca Azeredo, pela amizade e apoio recebido;*
- *A Maristela dos Santos, pela amizade e apoio recebidos:*
- *Ao dr. Domingos D'Oliveira (IEN/CNEN) pela colaboração durante a coleta de amostras, amizade e apoio recebido:*

- *Ao dr. José Marcos Godoy (IRD/CNEN) pela inestimável cooperação;*
- *À equipe do laboratório van de Graaff da PUC-RIO. agradeço a todos pela extrema cordialidade, colaboração e amizade;*
- *A equipe do Grupo de projeto da CNEN, pela colaboração na execução do projeto do ICN;*
- *A direção da Fábrica de Elemento Combustível (FEC/INB), pela colaboração na confecção do impactador;*
- *Aos colegas do Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD/CNEN);*
- *A direção e aos trabalhadores das três instalações. agradeço a todos pela extrema cordialidade e colaboração;*
- *Ao Instituto de Radioproteção e Dosimetria da Comissão Nacional de Energia Nuclear, e à sua superintendente Dra. Eliana Amaral pelas facilidades e oportunidades concedidas.*
- *Ao Instituto de Biofísica Carlos Chagas Filho da Universidade Federal do Rio de Janeiro, pela oportunidade concedida de realizar o curso de doutorado.*
- *A minha filha, Diana Moore de Almeida Dias da Cunha, e ao meu marido, José Waldemar Silva Dias da Cunha, pelo incentivo, compreensão e apoio nos momentos difíceis.*

RESUMO

No Brasil, cerca de 15,000 trabalhadores estão envolvidos na mineração e beneficiamento de minério contendo tório associado a sua rede cristalina. Nas diferentes etapas do processo de beneficiamento destes minérios são gerados aerossóis contendo Th. Para estimar o risco associado à inalação, destes aerossóis, é necessário estimar a exposição dos trabalhadores a partículas contendo tório. Os objetivos deste estudo foram: *i* -desenvolver um impactador em cascata nacional e *ii* - caracterizar a exposição de trabalhadores a partículas contendo Th em três instalações, as mineradoras A e B, que processam minério de Nb e a indústria C, que utiliza o Th como matéria prima na confecção de camisas para lampiões. Foi desenvolvido o impactador em cascata nacional - ICN que coleta partículas na faixa de 0,64 a 19,4 μm e tem a grande vantagem sobre outros existentes comercialmente por selecionar as partículas nas frações respirável e inalável do aerossol. A calibração experimental do ICN confirmou sua calibração teórica. A concentração e a distribuição de tamanho das partículas contendo Th foram determinadas, nas 3 instalações. Foram determinadas, também, as concentrações e distribuições de partículas contendo Nb, U, Zr, Pb, Fe, Y e Sr. Nestas instalações foram coletadas amostras de aerossol utilizando amostradores do tipo AGF e individual de lapela com ciclone e os resultados comparados com os obtidos com o ICN. Nas instalações B e C foram realizadas monitorações através da técnica de bioanálise em amostras de excreta de um grupo de trabalhadores. Os resultados indicam que, nas Instalações B e C, a incorporação sistêmica de Th não foi significativa.

ABSTRACT

There are around 15,000 workers in Brazil involved in the mining and milling processes of thorium bearing minerals. It is necessary to estimate the exposure of workers to airborne particulate containing thorium to estimate the risk associated with the inhalation of aerosols. The aims of this study were: i - to develop a national cascade impactor and ii - to characterize the exposure of workers to airborne particulate containing Th in two plants and one industry that were chosen. Plant A and Plant B process niobium ore and industry C uses thorium nitrate to manufacture gas mantle. The national cascade impactor - ICN was developed to collect particulate in the range of 0,64 up to 19,4 μm . Its advantage over commercially available cascade impactors is the selection of particulate in the respirable and inhalable fractions of aerosol. The experimental calibration of the ICN agreed with the theoretical calibration. The results obtained with the ICN were compared to the ones obtained with other selective air samplers, in 3 plants. The particle size distribution and the Th mass concentration were determined in those plants. The size distribution of particulate containing Nb, U, Zr, Pb, Fe, Y and Sr, and the elemental mass concentration was determined. A group of workers in installations B and C were also monitored through bioassay analysis of Th excreted in urine and feces. Air and bioassay results have shown that the systemic incorporation of Th is not significant.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	5
2.1	Principais amostradores de ar.....	7
2.2	Comportamento aerodinâmico das partículas.....	10
2.2.1	Movimento de partículas.....	10
2.3	Trato respiratório.....	16
2.3.1	Vias aéreas superiores.....	16
2.3.2	Região traqueobronquial (T-B).....	16
2.3.3	Região pulmonar.....	17
2.4	Deposição de partículas inaladas.....	17
2.5	Depuração de partículas inaladas.....	18
2.6	Modelos pulmonares.....	18
2.6.1	Modelo pulmonar sugerido na publicação 30 da ICRP.....	18
2.6.2	Modelo pulmonar sugerido na publicação 66 da ICRP.....	19
2.7	Modelo biocinético para tório.....	21
2.7.1	Modelo biocinético para o tório proposto na publicação 30 da ICRP.....	21
2.7.2	Modelo biocinético para o tório proposto na publicação 69 da ICRP.....	22
3.	DESENVOLVIMENTO DO IMPACTADOR EM CASCATA NACIONAL....	26

3.1	Cálculo dos diâmetros de corte.....	27
3.1.1	Cálculo teórico do diâmetro de corte dos estágios.....	27
3.2	Determinação experimental do diâmetro de corte.....	31
3.2.1	Arranjo experimental para calibração.....	32
3.3	Curva de eficiência do sexto estágio.....	43
3.4	Intercomparação com um impactador em cascata fabricado comercialmente.....	47
4	DESCRIÇÃO DAS INSTALAÇÕES ESTUDADAS.....	50
4.1	Descrição da Instalação A	50
4.1.1	Operação da lavra aluvionar.....	52
4.1.2	Lavra do minério primário e pré-concentração.....	52
4.1.3	Beneficiamento do minério.....	53
4.2	Descrição da Instalação B	55
4.3	Descrição da Instalação C	59
5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	61
5.1	Amostras de aerossóis.....	61
5.1.1	Impactador em cascata - ICN.....	62
5.1.2	Amostradores Grosso e Fino (AGF).....	63
5.1.3	Amostradores individuais de lapela.....	64
5.1.4	Calibração dos medidores de fluxo.....	64
5.2	Amostras biológicas.....	65
5.3	Amostras coletadas.....	66
5.3.1	Instalação A	66
5.3.2	Instalação B	66

5.3.3	Instalação C.....	67
5.4	Técnicas analíticas.....	68
5.4.1	Método PIXE.....	68
5.4.1.1	Calibração.....	71
5.4.2	Métodos radioquímicos utilizados na separação e concentração do tório e técnica de espectrometria alfa utilizada para medida da atividade de tório.....	74
5.4.3	Determinação do erro associado a cada amostra.....	79
5.4.4	Espectrometria de massa ICP-MS.....	79
5.4.3.1	Preparação das amostras.....	81
5.4.5	Limites de detecção de ^{232}Th e ^{228}Th nas amostras de aerossóis.....	81
6	RESULTADOS	83
6.1	Caracterização da poeira de minério na instalação A.....	83
6.1.1	Caracterização das partículas contendo os elementos de interesse na fração respirável da poeira de minério.....	83
6.1.2	Concentração em atividade de ^{232}Th e de ^{228}Th nas frações respirável e inalável da poeira de minério.....	91
6.2	Caracterização da poeira de minério na Instalação B.....	94
6.2.1	Caracterização das partículas contendo os elemento de interesse na fração respirável do aerossol.....	95
6.2.2	Concentração de ^{232}Th e de ^{228}Th nas frações respirável e inalável do aerossol.....	101
6.2.3	Amostras biológicas coletadas na Instalação B.....	104
6.3	Amostras coletadas na Instalação C.....	111

6.3.1	Caracterização do aerossol contendo os elementos de interesse.....	111
6.3.2	Concentração de ^{232}Th e ^{228}Th na fração respirável do aerossol.....	112
6.3.3	Amostras biológicas coletadas na Instalação C	113
6.4	Grupo controle.....	114
7	DISCUSSÃO.....	116
7.1	Impactador em cascata nacional - ICN.....	116
7.1.1	Calibração do Impactador em cascata nacional - ICN.....	116
7.1.2	Comparação do ICN com os amostradores do tipo AGF....	117
7.1.3	Comparação do ICN com os amostradores individuais de lapela	119
7.2	Caracterização da exposição de trabalhadores a aerossóis contendo tório, na Instalação A	122
7.2.1	Caracterização dos aerossóis	122
7.3	Caracterização da exposição de trabalhadores a aerossóis contendo tório, na Instalação B	125
7.3.1	Caracterização do aerossol	125
7.3.2	Caracterização da incorporação de Th pelos trabalhadores na Instalação B	128
7.4	Caracterização da exposição de trabalhadores a aerossóis contendo tório, na instalação C	132
8	CONCLUSÃO.....	134
8.1	Impactador em cascata nacional - ICN.....	134
8.2	Comparação do ICN a outros amostradores seletivos de partículas	135

8.3	Caracterização da exposição dos trabalhadores na Instalação A com base em estudos de amostragem de ar	135
8.4	Caracterização da exposição dos trabalhadores na Instalação B com base em estudos de amostragem de ar	137
8.5	Caracterização da incorporação de Th pelos trabalhadores nas Instalações A e C	137
8.6	Recomendações.....	139
Anexo 1	Método PIXE.....	140
Anexo 2	Testes estatísticos.....	146
Apêndice A	Caracterização das amostras de aerossóis coletadas na Instalação A	165
Apêndice B	Caracterização das amostras de aerossóis coletadas na Instalação B	172
Apêndice C	Caracterização das amostras de aerossóis coletadas na Instalação C	178
	Referências bibliográficas.....	184

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Esquema simplificado das linhas de fluxo em um sistema onde as linhas de fluxo apresentam um desvio de 90°	13
Figura 2.2	Esquema simplificado do trato respiratório.....	20
Figura 2.3	Esquema simplificado do modelo biocinético para o tório proposto na publicação 69 do ICRP	23
Figura 3.1	ICN desmontado, mostrando os orifícios de cada estágio, suportes das superfícies impactadoras e a caixa de transporte de amostras	29
Figura 3.2	Esquema do impactador em cascata nacional (ICN)	30
Figura 3.3	Arranjo experimental usado para gerar partículas na faixa de $0,3$ a $0,7 \mu\text{m}$	32
Figura 3.4	Variação da vazão em relação à tensão aplicada à válvula controladora do fluxo do ar de excesso.....	39
Figura 3.5	Variação da vazão em relação à tensão aplicada à válvula controladora do fluxo de ar de limpo	39
Figura 3.6	Variação da vazão em relação a tensão aplicada à válvula controladora do fluxo do aerossol monodisperso	40
Figura 3.7	Arranjo experimental usado para gerar partículas entre $0,8$ a $2,2 \mu\text{m}$	41
Figura 3.8	Curva de eficiência experimental determinada para o sexto estágio do ICN	46
Figura 3.9	Valores de MMAD determinados usando o ICN e o impactador em cascata comercial (DIC-6)	48
Figura 4.1	Fluxograma esquemático das principais etapas de extração e beneficiamento de minério, na Instalação A	54

Figura 4.2	Esquema simplificado das principais etapas do processo e beneficiamento de minério, na Instalação B	56
Figura 4.3	Esquema simplificado das principais etapas do processo de confecção de camisas para lampiões	59
Figura 5.1	Fotografia dos três amostradores usados para coletar amostras de partículas de aerossóis.....	65
Figura 5.2	Arranjo experimental da linha de PIXE no acelerador Van de Graaff da PUC-RIO	69
Figura 5.3	Esquema da câmara de espalhamento montada na linha de PIXE	70
Figura 5.4	Esquema da eletrônica utilizada para aquisição dos espectros de raios X característicos emitidos pelo alvo (amostra).....	70
Figura 5.5	Curva de eficiência absoluta do método PIXE, no arranjo experimental usado.....	72
Figura 5.6	Curva do limite de detecção do método para os elementos com número atômico (Z) ≤ 42	73
Figura 5.7	Curva do limite de detecção do método para os elementos com número atômico (Z) ≥ 43	73
Figura 5.8	Esquema dos métodos radioquímicos de extração e concentração do tório.....	75
Figura 6.1.	Esquema mostrando os locais, nos quais foram coletadas as amostras, na usina de extração do minério do leito do igarapé.....	84
Figura 6.2	Esquema mostrando os locais, nos quais foram coletadas as amostras no Morro do Primário.....	84

Figura 6.3	Esquema mostrando os locais, nos quais foram coletadas as amostras no laboratório de controle de qualidade do minério	85
Figura 6.4	Esquema mostrando os locais, nos quais foram coletadas as amostras na Usina de Beneficiamento de Minério (UBM-1) ...	86
Figura 6.5	Esquema mostrando os pontos onde foram coletadas as amostras na Usina de Beneficiamento de Minério (UBM-3) ...	86
Figura 6.6	Esquema mostrando os locais de coleta de amostras na casa da vila	88
Figura 6.7	Esquema mostrando os locais, nos quais foram coletadas as amostras, na etapa de britagem do minério.....	96
Figura 6.8	Esquema mostrando os locais, nos quais foram coletadas as amostras, na etapa de lixiviação.....	97
Figura 6.9	Esquema mostrando os locais, nos quais onde foram coletadas as amostras, durante de metalurgia e britagem da liga Fe-Nb	97
Figura 6.10	Esquema mostrando o local, no qual foram coletadas as amostras, na etapa de britagem da escória	98
Figura 6.11	Comparação entre incorporação via inalação e ingestão, para 1 ano de trabalho.....	107
Figura 6.12	Concentrações de ^{232}Th nas amostras de fezes fornecidas pelos trabalhadores, antes e após as férias.....	110
Figura 6.13	Concentrações de ^{228}Th nas amostras de fezes fornecidas pelos trabalhadores antes e após as férias.....	110
Figura 6.14	Esquema mostrando os locais, nos quais foram coletadas as amostras de aerossóis, nas etapas de confecção de camisas para lampiões	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Principais parâmetros de construção do impactador em cascata nacional.....	29
Tabela 3.2	Valores do fluxo de aerossol polidisperso mantendo constante a tensão aplicada a barra coletora em 9 000 V	37
Tabela 3.3	Valores da tensão aplicada na barra coletora para um fluxo polidisperso constante igual a 3 l/min	38
Tabela 3.4	Variação da distribuição de tamanho das partículas em cada uma das concentrações usadas para gerar as partículas no primeiro arranjo experimental	45
Tabela 3.5	Tamanho das partículas para as diferentes concentrações usadas para gerar as partículas no segundo arranjo experimental.....	47
Tabela 3.6	Diâmetro de corte dos estágios do impactador em cascata nacional (ICN) e do impactador comercial (DIC-6), para vazão de calibração de 12 l/min	46
Tabela 4.1	Análise quantitativa da composição elementar do minério por fluorescência de raios X	55
Tabela 5.1	Limite de detecção do tório e urânio, na análise por espectrometria alfa	78
Tabela 5.2	Limite de detecção do ^{232}Th e do ^{228}Th , nos três métodos da amostragem de aerossóis utilizados	82
Tabela 6.1	Concentração dos elementos de interesse na fração respirável da poeira de minério. Amostras coletadas com o ICN na Instalação A	87

Tabela 6.2	Tamanho das partículas (MMAD) contendo os elementos de interesse e o σ_g . Amostras coletadas com o ICN na Instalação A	90
Tabela 6.3	Concentrações de ^{232}Th e ^{228}Th nas frações respirável e inalável da poeira de minério. Amostras coletadas com AGF, na Instalação A	91
Tabela 6.4	Concentração calculada de ^{232}Th , na fração respirável da poeira de minério. Amostras coletadas com ICN, Instalação A	93
Tabela 6.5	Concentrações de ^{232}Th e ^{228}Th na fração respirável da poeira de minério. Amostras coletadas com amostradores individuais de lapela, na Instalação A	94
Tabela 6.6	Concentração dos elementos de interesse na fração respirável do aerossol. Amostras coletadas com o ICN na instalação B ...	95
Tabela 6.7	Tamanho das partículas (MMAD) contendo os elementos de interesse e o σ_g . Amostras coletadas com o ICN, na instalação B	100
Tabela 6.8	Concentração de ^{232}Th e ^{228}Th na fração respirável e inalável do aerossol. Amostras coletadas com AGF, na Instalação B ...	101
Tabela 6.9	Concentração calculada de ^{232}Th , na fração respirável do aerossol. Amostras coletadas com ICN, na Instalação B	102
Tabela 6.10	Concentração de ^{232}Th e de ^{228}Th na fração respirável do aerossol. Amostras coletadas com amostrador individual de lapela, na Instalação B	103
Tabela 6.11	Concentração ^{232}Th e ^{228}Th nas amostras de fezes fornecidas pelos trabalhadores. Amostras coletadas na Instalação B	105
Tabela 6.12	Concentração de ^{232}Th e ^{228}Th nas amostras de fezes fornecidas por um membro de nossa equipe técnica, que participou da coleta de amostras de aerossóis	106

Tabela 6.13	Concentração de ^{232}Th e ^{228}Th nas amostras de fezes de trabalhadores. Amostras coletadas na Instalação B, antes e após das férias dos trabalhadores	109
Tabela 6.14	Concentração dos elementos de interesse na fração respirável do aerossol e tamanho das partículas. Amostras coletadas com o ICN, na Instalação C	112
Tabela 6.15	Concentrações de ^{232}Th e ^{228}Th na fração respirável aerossol. Amostras coletadas com amostradores individuais de lapela, na Instalação C	112
Tabela 6.16	Concentrações de ^{232}Th e ^{228}Th nas amostras de fezes fornecidas pelos trabalhadores da Instalação C	114
Tabela 6.17	Concentrações de ^{232}Th e ^{228}Th nas amostras de fezes do grupo controle na cidade do Rio de Janeiro.....	115
Tabela 7.1	Concentração de ^{232}Th nas amostras coletadas com ICN e AGF, nas duas visitas realizadas à Instalação A	117
Tabela 7.2	Concentração de ^{232}Th nas amostras coletadas com ICN e AGF, nas duas visitas realizadas à Instalação B.....	117
Tabela 7.3	Concentração de ^{232}Th nas amostras coletadas com ICN e amostradores individuais de lapela, nas duas visitas realizadas à Instalação A	120
Tabela 7.4	Concentração de ^{232}Th nas amostras coletadas com ICN e amostradores individuais de lapela, nas duas visitas realizadas à Instalação B	121
Tabela 7.5	Concentração de ^{232}Th e de ^{228}Th nas amostras de fezes dos trabalhadores e nas amostras de aerossol coletadas com os amostradores individuais de lapela por eles usados	129

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O homem sempre esteve exposto à radiação ionizante de origem natural, proveniente dos raios cósmicos e de radionuclídeos presentes na crosta terrestre. Tem-se intensificado na última década, em nível internacional, a preocupação no sentido de se controlar, além das exposições devido ao ciclo do combustível nuclear, aquelas resultantes das exposições a fontes naturais e de radiação proveniente de técnicas nucleares aplicadas a indústria, medicina e outros (Papastefanou, 1996; Wang et al., 1996).

Dentre os radionuclídeos presentes na crosta terrestre, destacam-se o tório (Th) e o urânio (U). A principal fonte de tório, a nível mundial, são as areias monazíticas, onde o Th ocorre como impureza na rede cristalina da monazita. Os cinco maiores depósitos de monazita estão localizados na Índia, EUA, Austrália, antiga URSS, Brasil e China (Paschoa, 1994).

Importantes estudos sobre a exposição a tório e seus produtos de decaimento, de trabalhadores envolvidos no beneficiamento da monazita, e de indivíduos do público vêm sendo desenvolvidos no Brasil (Roser & Cullen, 1975; Costa Ribeiro et al., 1975; Lipsztein et al., 1989; Mafra et al., 1991; Dias da Cunha et al., 1988), na Austrália (Hartley & Hewson, 1993; Terry et al., 1995; Hewson, 1988), na Índia (Sohrabi, 1990; Sunta, 1990; Naranya et al., 1995), e na China (Chen Xing-an et al.; 1993).

No Brasil, existem duas atividades industriais consideradas as mais relevantes em relação ao risco de incorporação do tório e seus filhos, a saber:

- 1 - mineração e beneficiamento da monazita, que compreende a exploração das jazidas de praia, o processamento da areia monazítica para obtenção de cloreto de terras raras, no qual o concentrado de tório é obtido como sub-produto do beneficiamento da monazita, a produção do nitrato de tório e sua utilização como matéria-prima na confecção de camisas para lâmpadas; e

2 - mineração e beneficiamento de minérios de minérios (exceto monazita) que contém Th e U associados à rede cristalina.

No nosso país, os primeiros estudos sobre monitoração das áreas de ocorrência de monazita foram realizados por Roser e Cullen em 1962. Em 1973, Castanho e Cruz catalogaram as principais ocorrências de tório e terras raras.

No Brasil, a areia monazítica é processada para obtenção de concentrados de rutilo, ilmenita, zirconita e monazita. Esta última é beneficiada para obtenção dos concentrados de terras-raras. A Torta II (concentrado de tório e urânio) é obtida como subproduto do beneficiamento da monazita para obtenção do concentrado de terras raras. O nitrato de tório é produzido a partir do beneficiamento deste concentrado (Castanho & Cruz, 1973; Paschoa, 1994).

O tório e o urânio também podem ocorrer na natureza como impureza em vários minérios, tais como carvão, cassiterita, silicatos, fosfatos, pirocloro, rutilo, zirconita e ilmenita. Muito embora o teor de Th e U não seja suficiente para classificar estes minérios como radioativos, de acordo com os critérios da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), os processos de lavra e beneficiamento, do minério contendo Th e U, acabam concentrando estes radionuclídeos entre seus vários produtos, subprodutos e resíduos. Isto pode conduzir a situações que envolvam, ou venham a envolver, no futuro, problemas de exposição ocupacional e de meio ambiente, em geral.

As principais ocorrências de minérios com tório e/ou urânio, no Brasil, estão localizadas em Pitinga (AM), Boquira (BA), Buena (RJ), Lagoa Real (BA), Itataia (CE), Patos de Minas (MG), Araxá (MG), Catalão (GO), Figueira (PR), Iporá (GO), Rio Cristalino (GO), Poços de Caldas (MG) e outras (Castanho & Cruz, 1973). O beneficiamento de minérios contendo Th e/ou U associados, no Brasil, envolve cerca de 15 000 trabalhadores, segundo um levantamento feito junto às mineradoras que processaram estes minérios no período de 1989 a 1991, com base em informações obtidas junto ao Conselho de Pesquisa e Recurso Mineral (CPRM), e pelas mineradoras.

O beneficiamento do minério é feito por processos físicos e químicos nos quais são gerados aerossóis. Deste modo, os trabalhadores envolvidos nas diferentes etapas destes processos estão expostos a partículas de minério que podem causar

riscos à sua saúde.

As partículas passíveis de serem inaladas podem consistir de gotículas de líquido finamente divididas ou partículas sólidas. As suspensões relativamente estáveis de partículas líquidas ou sólidas num meio gasoso são chamadas coletivamente de aerossóis (Raabe, 1994). Estas suspensões de partículas são muitas vezes chamadas coloquialmente de particulados.

Para avaliar os riscos devido à inalação destas partículas é necessário conhecer as suas propriedades físicas e químicas. No caso de aerossóis contendo tório, além dos riscos convencionais associados às propriedades químicas do aerossol, devemos considerar os riscos associados à inalação de partículas radioativas.

Dentre as propriedades físicas dos aerossóis, o tamanho das partículas é uma das mais importantes, pois este influenciará na penetração no trato respiratório e no local de deposição da partícula, ao penetrar no trato respiratório.

OBJETIVO

Os objetivos do presente trabalho foram:

- projetar e construir o primeiro impactador em cascata nacional. O impactador em cascata é um amostrador de ar que classifica as partículas amostradas por faixas de tamanho com base nas propriedades aerodinâmicas das partículas. O impactador em cascata desenvolvido neste trabalho apresenta vantagens sobre os existentes comercialmente, pois diferencia a fração dos aerossóis coletados que penetram no trato respiratório, mas não atingem a região pulmonar da fração que atinge a região pulmonar.

- caracterizar a exposição de trabalhadores a poeira de minério contendo Th em três instalações: duas mineradoras e uma indústria que utiliza o nitrato de tório como matéria-prima na confecção de camisas para lampiões mostrando a importância da utilização do impactador em cascata.

Para alcançar estes objetivos, foi necessário, após a construção do impactador em cascata nacional:

- calibrar o impactador em cascata nacional (ICN);
- comparar o ICN com outro amostrador comercialmente existente;

- desenvolver um programa de amostragem de ar nas três instalações utilizando o ICN além de amostradores do tipo AGF e de lapela e
 - comparar os resultados obtidos com os três tipos de amostradores;
 - caracterizar as partículas contendo Th, determinando as distribuições de tamanho e as concentrações nas frações respirável e inalável de aerossóis, nas principais áreas das instalações:
 - monitorar um grupo de trabalhadores ocupacionalmente expostos através de bioanálise *in vitro*, comparando os resultados com um grupo controle;
 - comparar os resultados da monitoração por bioanálise *in vitro* com os resultados das amostragens de ar.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A poeira de minério é formada por partículas transportadas pelo ar com diâmetro aerodinâmico na faixa de 0,5 a 100 μm (Hinds, 1982). A dose devido à inalação das partículas contendo tório depende das propriedades físicas e químicas dos aerossóis.

O tamanho das partículas de poeira de minério varia com as características de cada instalação, com a composição do aerossol gerado e ao longo do tempo (Hinds, 1982). Na avaliação do risco devido a inalação, é importante estimar a deposição no trato respiratório, que depende de diversas características físicas da partícula, como o tamanho, forma e densidade. O tamanho das partículas é definido como o diâmetro de uma esfera equivalente com densidade unitária que tem a mesma velocidade terminal¹, sob ação da gravidade, das partículas no aerossol. Assim, partículas com forma e densidade diferentes podem ser representadas pela mesma esfera equivalente (Raabe, 1994).

A distribuição das partículas presentes em determinado ambiente devem ser descritas em termo de seu diâmetro aerodinâmico.

A distribuição de tamanho aerodinâmico das partículas de aerossóis pode ser determinada através da medida de atividade das partículas. O AMAD² é o valor do diâmetro da partícula que divide a curva de distribuição de atividade em relação ao diâmetro em duas áreas iguais. considera-se que a distribuição dos diâmetros aerodinâmicos em função das frações de atividade apresenta a forma de uma distribuição log-normal. As partículas radioativas são, então, geralmente,

¹Velocidade terminal: velocidade constante das partículas, a partir do momento em que a força de resistência do fluido (ar) F_D se iguala a força da gravidade.

²AMAD é (Diâmetro Aerodinâmico Mediano de Atividade) definido como o diâmetro de uma esfera de densidade unitária e mesma velocidade terminal da partícula real no fluido, cuja atividade é a mediana para todos os aerossóis (ICRP, 1979).

caracterizadas em termos do AMAD e do desvio padrão geométrico associado (σ_g). Quando a propriedade medida é a massa das partículas utiliza-se o diâmetro aerodinâmico mediano de massa MMAD³ (Raabe, 1994).

Quando as partículas são muito pequenas (diâmetros menores que 0.5 μm), como consequência do movimento Browniano, elas estão em movimento contínuo e impactam constantemente as superfícies. Esta propriedade das partículas pequenas é chamada de difusão e é a responsável pela eficiência de coleta em filtros ou pela sua deposição no trato respiratório durante a inalação e é descrita em termos do diâmetro de difusão ou do diâmetro termodinâmico. O diâmetro de difusão ou termodinâmico é definido como sendo o diâmetro geométrico de uma partícula esférica com a mesma difusão que a partícula em questão, nas mesmas condições. Quando as partículas são muito pequenas podem ser caracterizados em função do Diâmetro Termodinâmico Mediano de Atividade (AMTD), ou seja, equivalente ao diâmetro das partículas de aerossóis cuja atividade é a mediana para todos os aerossóis (Raabe, 1994).

No trabalho de revisão publicado, em 1995, por Dorrian e Bailey foram revistos 50 trabalhos com dados de tamanho de aerossóis em áreas ocupacionais. Na análise dos resultados destes trabalhos, foi concluído que o valor médio de AMAD em áreas ocupacionais era 4,4 μm . Nas centrais nucleares, o valor médio de AMAD foi 3,9 μm . Nas instalações que manipulam material radioativo, este valor foi 3,8 μm . Nas minas de urânio, foi 6,8 μm .

Além dos trabalhos incluídos na revisão de Dorrian e Bailey (1995), mais quatro trabalhos merecem destaque, a saber: Khurshid em 1984, determinou o AMAD de 7,47 μm para as partículas de instalações nucleares. Hartley e Hewson (1993), baseados em dados obtidos de amostradores de área, concluíram que a distribuição de poeira em áreas de trabalho é complexa. Possivelmente, ela apresenta uma distribuição bimodal, com uma moda principal entre 20 e 50 μm , e a secundária entre 1 e 2 μm . O valor de AMAD que caracteriza o aerossol nestas áreas é maior que 10

³MMAD (Diâmetro Aerodinâmico Mediano de Massa) é definido como o diâmetro da esfera que corresponde a 50% da distribuição de massa em relação ao diâmetro aerodinâmico da partícula equivalente. Quando as distribuição de massa e de atividade em relação ao diâmetro aerodinâmico das partículas são iguais, podemos considerar que o MMAD é igual ao AMAD (Hinds, 1982).

μm . Nos estudos realizados por Terry et. al. (1995) para avaliar a incorporação da poeira de monazita, em uma usina de beneficiamento de areias monazíticas, o valor de AMAD adotado foi 10 μm . Terry e Hewson (1995) adotaram 14 μm como valor médio de AMAD das partículas de areias monazíticas. Os valores de AMAD das partículas de poeira de monazita determinados por Mason et. al. (1985) variaram de 3,6 a 7,0 μm .

No Brasil, o tamanho de partículas geradas durante o entamboramento do *yellowcake*, na usina de Poços de Caldas, variaram de 0,72 a 5,7 μm (Carvalho et al., 1988). Os valores de MMAD, determinados para poeira de areias monazíticas, durante a moagem do concentrado de monazita variaram de 1,05 a 2,09 μm , e a distribuição de tamanho das partículas apresentaram uma distribuição bimodal (Dias da Cunha et al., 1989). Estes trabalhos estão incluídos na revisão de Dorrian e Bailey (1995)

2.1 PRINCIPAIS AMOSTRADORES DE AR

Um elemento essencial no estudo dos aerossóis é a capacidade de coletar amostras para análise. Estas amostras devem ser representativas das concentração e da distribuição de tamanho das partículas no ar. Por este motivo é importante a escolha das técnicas de amostragem depende:

- i - do tipo de aerossol que será amostrado;
- ii - da propriedade da partícula que desejamos determinar;
- iii - da fração do aerossol que desejamos amostrar (Hinds, 1982; Lippmann, 1989a).

Os vários amostradores de partículas transportadas pelo ar, disponíveis comercialmente, podem ser agrupados em duas categorias gerais (Lippmann, 1989a; BSI, 1975) que são:

- i - sem diferenciação significativa do tamanho;

Os amostradores sem diferenciação significativa de tamanho são denominados, comumente, amostradores de poeira total. Estes amostradores, normalmente, possuem um único estágio e as amostras de partículas coletadas são analisadas para determinação da massa total coletada (Lippmann, 1989a).

- ii - amostradores com diferenciação de tamanho.

Os amostradores com diferenciação de tamanho classificam as partículas em

diferentes faixas de tamanho. Existem vários destes amostradores disponíveis, comercialmente. Os principais amostradores baseiam-se nas propriedades óticas, eletrostáticas e aerodinâmicas das partículas.

Os amostradores óticos baseiam-se no espalhamento da luz pela partícula, e são usados, principalmente, na classificação de partículas geradas em laboratórios. Um fluxo de aerossol com velocidade constante e controlada é produzido na saída de um orifício durante todo o período de medida. Para um fluxo de aerossol polidisperso, a aceleração de cada partícula será inversamente proporcional ao seu tamanho aerodinâmico. Como as partículas passam uma de cada vez pelo feixe, um sistema de lente coleta a luz espalhada e a focaliza em um tubo fotomultiplicador. A partícula ao passar através o feixe produz um par de pulsos elétricos. O tempo entre os dois pulsos é medido em um relógio digital de alta velocidade. O tamanho das partículas é relacionado ao intervalo de tempo entre estes dois pulsos. Por exemplo, em um dado arranjo experimental, partículas com 0,5 μm de diâmetro produzem um pulso com intervalo de 800 nanosegundos e partículas com 30 μm , pulsos com intervalo de 5 000 nanosegundos. No cálculo da distribuição de tamanho das partículas, não são considerados a variação na composição das partículas (densidade), o fator de forma, o índice de refração das partículas e a rugosidade da superfície das partículas (Lippmann, 1989a).

Os amostradores do tipo classificadores eletrostáticos selecionam partículas segundo as propriedades eletrostáticas. Quando o aerossol penetra em um classificador eletrostático, as partículas com carga elétrica suficiente para vencer as forças que o campo elétrico exerce sobre elas, deixam o classificador e as com carga menor são coletadas na barra coletora. A força que um campo elétrico exerce sobre uma partícula carregada depende da intensidade do campo, da carga da partícula e do tamanho da partícula. A carga de uma partícula é proporcional ao seu tamanho. Deste modo, é possível selecionar as partículas segundo o tamanho. Como o amostrador ótico, a principal utilização deste amostrador é em laboratório (Hinds, 1982; Lippmann, 1989a; IAEA, 1978).

No estudo da avaliação dos riscos associados à inalação de partículas é necessário caracteriza-las. O método mais eficiente para caracteriza-las é aquele que seleciona as partículas de aerossóis, com base nas suas propriedades aerodinâmicas,

do mesmo modo que é fracionado dentro do trato respiratório. Assim, as diferenças na forma e na densidade são compensadas automaticamente (Lippmann, 1989a).

Em higiene industrial a caracterização mais simples dos aerossóis consiste na classificação dos mesmos nas frações inalável e respirável. A fração inalável consiste das partículas que penetram no trato respiratório mas não atingem a região pulmonar (diâmetro aerodinâmico entre 2,5 e 10 μm).

A fração respirável consiste das partículas com diâmetros aerodinâmicos menores que 2,5 μm e que podem atingir a região pulmonar (Vicent & Mark, 1981; Hondors, 1987)

Com o objetivo de coletar amostras nas frações respirável e inalável do aerossol, existem vários amostradores cujo funcionamento baseia-se no comportamento aerodinâmico do aerossol. Os principais tipos de amostradores são os ciclones, os impactadores e Amostradores Grosso e Fino (AGFs).

Nos ciclones a partícula, ao penetrar no amostrador, é forçada a descrever uma trajetória circular. Deste modo, atua sobre ela uma força centrípeta. As partículas com massa suficiente para vencer as forças que o fluido exerce sobre elas deixam as linhas de fluido e são coletadas no final do ciclone. As demais seguem as linhas de fluxo e são coletadas sobre um filtro (coletor). A fração coletada no filtro depende da geometria do ciclone, da velocidade do fluxo e da eficiência de retenção do filtro. Os ciclones são normalmente usados como estágio inicial dos amostradores. Ele seleciona as partículas na fração de interesse em amostradores de um único estágio (filtro) (Hinds, 1982; Lippmann, 1989a; IAEA, 1978).

Nos impactadores, atua sobre as partículas do aerossol a força da gravidade. O princípio de funcionamento do impactador em cascata baseia-se nas equações de Stokes para fluxo de ar (Hinds, 1982) e na conservação da quantidade de movimento das partículas em suspensão. Sua teoria tem sido exaustivamente discutida na literatura (Mercer, 1965; 1963; Marple et al., 1974; Marple & Willeke, 1975; Raabe, 1976; Hering, et al. 1978; Marple & Lui, 1974; Hinds, 1982). Quando o fluxo de ar encontra um obstáculo desvia suas linhas de fluxo da trajetória inicial. As partículas com massa suficiente para vencer a força que o fluido exerce sobre elas deixam as linhas de fluxo e impactam na superfície de impactação; as demais seguem as linhas de fluxo. Quando usados em série, os impactadores são denominados impactadores

em cascata, e permitem separar as partículas do aerossol em mais de uma faixa de tamanho (Hinds, 1982; Lippmann, 1989a; IAEA, 1978).

Os amostradores do tipo AGF utilizam um pré-seletor de partículas ou *inlet*. Deste modo, somente as partículas com massa menores que um valor de corte são arrastadas pelas linhas de fluxo e penetram no amostrador. Ao penetrar no amostrador as partículas são selecionadas em dois filtros, os quais separam as partículas em duas frações do aerossol. As partículas são separadas em duas frações de tamanho, dependendo da velocidade do fluxo e da eficiência de retenção do filtro usado como coletor (Lippmann, 1989a).

2.2 COMPORTAMENTO AERODINÂMICO DAS PARTÍCULAS

O funcionamento dos amostradores inerciais baseia-se no movimento das partículas em fluido. O comportamento aerodinâmico das partículas depende da faixa de tamanho do aerossol (Hinds, 1982).

2.2.1 MOVIMENTO DE PARTÍCULAS

As equações de Navier (Fuchs, 1990; Hinds, 1982) descrevem o movimento de uma partícula em um fluido. Estas equações são derivadas da aplicação da segunda Lei de Newton a um elemento de fluido, onde as forças que atuam sobre o corpo incluem as forças devido à pressão e as forças viscosas. No entanto, estas equações não aceitam soluções analíticas. Em geral, são feitas algumas simplificações para que possam ser resolvidas. Stokes fez algumas considerações de modo a tornar possível uma solução analítica para a equação geral de Navier. A solução apresentada por Stokes baseia-se em 4 hipóteses:

- i) que as forças inerciais são desprezíveis, quando comparadas com as forças viscosas, eliminando os termos de ordem mais alta na equação de Navier-Stokes;
- ii) fluido incompressível;
- iii) que não existem paredes ou outra partícula próxima à partícula estudada, sendo obtido um sistema de equações lineares que pode ser resolvido;
- iv) a partícula é considerada como uma esfera rígida indeformável; e
- v) a velocidade do fluido na superfície da partícula é zero.

A solução de Stokes descreve as forças que atuam em qualquer ponto do

fluido que envolve uma partícula esférica. A força (F_D) que atua sobre a partícula é representada pela equação:

$$F_D = 3\pi\eta Vd \quad 2.1$$

onde:

η → viscosidade do fluido;

V → velocidade da partícula em relação ao fluido;

d → diâmetro da partícula.

Quando o movimento de uma partícula é descrito por esta equação, é dito que a partícula está na região de Stokes (Hinds, 1982; Marple & Willeke, 1975).

Quando a partícula tem forma irregular, a força F_D é dada por:

$$F_D = 3\pi\eta Vd\chi \quad 2.2$$

onde χ é o fator de correção de forma aerodinâmico. Este fator relaciona a força que atua sobre a partícula de forma irregular com a força que atua sobre a partícula esférica de diâmetro d com o mesmo volume e velocidade terminal da partícula irregular (Hinds, 1982).

Na solução de Stokes, é considerado que a velocidade do fluido na superfície da partícula é zero em relação a partícula (ou seja o fluido na superfície da partícula adere e se move com a superfície). No entanto, para as partículas pequenas, cujo diâmetro aproxima-se do livre caminho médio dos gases, possuem velocidade maior que a prevista pela equação 2.1. Cunningham determinou um fator de correção para a equação de Navier-Stokes que é sempre maior que 1, e dependente das condições de pressão, temperatura e do tamanho da partícula. Este fator, conhecido como *fator de correção de Cunningham* (C_C) (Hinds, 1982; Marple, 1978), é definido pela equação:

$$C_c = 1 + 2,492 \frac{\lambda}{d} + 0,84 \frac{\lambda}{d} \exp\left(-0,43 \frac{d}{\lambda}\right) \quad 2.3$$

onde:

C_c → fator de correção de Cunningham;

λ → livre caminho médio nos gases;

d → diâmetro da partícula.

Deste modo, a força de resistência (F_D^C) que o fluido exerce sobre a partícula é expressa pela equação (Hinds, 1982):

$$F_D^C = \frac{3\pi \eta V d}{C_c} \quad 2.4$$

onde:

C_c → fator de correção de Cunningham;

η → coeficiente de viscosidade dinâmico do fluido;

V → velocidade da partícula em relação ao fluido;

d → diâmetro da partícula.

Quando a partícula atinge a velocidade terminal ela segue as linhas de fluxo do fluido. Quando as linhas de fluxo são desviadas de suas trajetórias iniciais por um anteparo as partículas seguem as linhas de fluxo e descrevem um movimento curvilíneo. Na Figura 2.1, é apresentado o esquema simplificado das linhas de fluxo, em um sistema onde as linhas de fluxo apresentam um desvio de 90°.

Nos impactadores inerciais, o aerossol passa por um orifício e na saída o fluido incide sobre uma superfície plana (prato de impactação), que desvia as linhas de fluxo em um ângulo de 90° em relação à trajetória inicial. As partículas com massa maiores sofrem desvios que não são suficientes para acompanhar as linhas de fluxo indo impactar no prato. As partículas com massa menores seguem as linhas de fluxo (Hinds, 1982; Marple & Willeke, 1975).

No cálculo da eficiência de impactação, considera-se que o fluxo é uniforme na saída do orifício. e que as linhas de fluxo, na área de impactação, são arcos de

círculo.

O desvio radial total das partículas da linha de fluxo do fluido, Δ , é determinado pelo produto da velocidade radial da partícula pelo tempo necessário para percorrer o intervalo da trajetória correspondente a um quarto de círculo (Hinds, 1982), como calculado pela equação abaixo:

$$\Delta = V_r t \quad 2.5$$

onde:

V_r → velocidade radial da partícula ao descrever a trajetória circular no fluido;

t → tempo gasto pela partícula para percorrer a trajetória de um quarto de círculo.

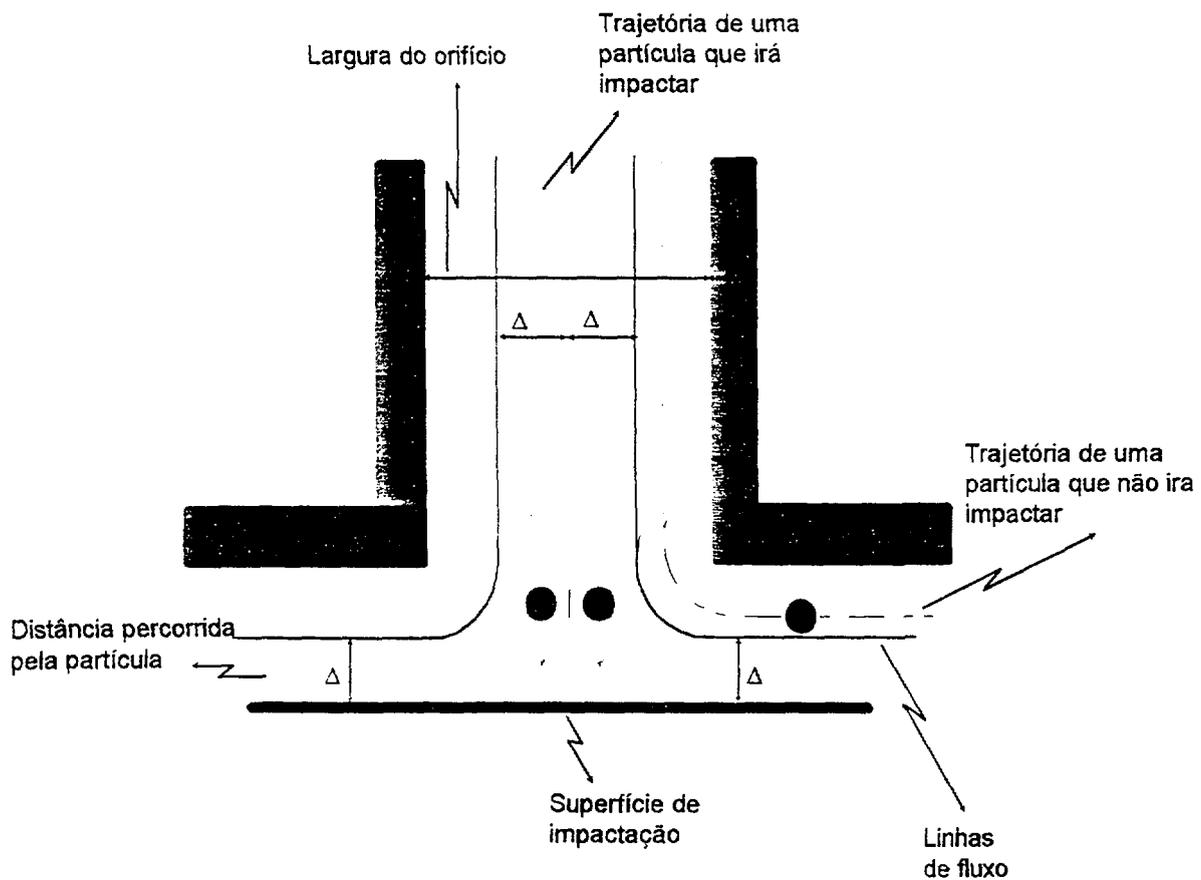


Figura 2.1 Esquema simplificado das linhas de fluxo, em um sistema onde as linhas de fluxo apresentam um desvio de 90°.

Quando uma força externa⁴ atua sobre uma partícula, o tempo necessário para a partícula ajustar a sua velocidade na nova condição de força é chamado de tempo de relaxação (τ). Para partículas na região de Stokes o tempo de relaxação é dado por (Hinds, 1982):

$$\tau = \frac{\rho_p d^2 C_c}{18\eta} \quad 2.6$$

onde:

C_c → fator de correção de Cunningham;

η → viscosidade do fluido;

ρ_p → densidade da partícula;

d → diâmetro da partícula.

Levando-se em consideração o tempo de relaxação da partícula no fluido (τ), a velocidade inicial do fluido, a distância da trajetória à superfície de impactação (limite para impactação) é dada por (Hinds, 1982):

$$\Delta = \frac{\pi}{2} \tau U \quad 2.7$$

onde:

τ → tempo de relaxação da partícula;

U → velocidade do fluido no orifício.

A mobilidade de uma partícula (B) (Hinds, 1982) é definida como a razão entre a velocidade terminal de uma partícula, que se move na região de Stokes, e a força externa que atua sobre ela. Quando a força externa que atua sobre a partícula é a força da gravidade, a mobilidade é expressa por:

⁴Força externa, neste estudo, significa força que atua sobre a partícula a distância, tal como, forças da gravidade, centrífuga ou eletrostática. A força de resistência que o fluido exerce sobre a partícula (ou simplesmente força do fluido sobre a partícula) não é considerada uma força externa.

$$B = \frac{C_c}{3\pi\eta d} \quad 2.8$$

onde:

C_c → fator de correção de Cunningham;

η → viscosidade do fluido;

d → diâmetro da partícula.

As partículas que estão no interior do cilindro definido por Δ , ou seja, as partículas com massa igual ou maior que a das partículas com mobilidade (B), impactam, e as demais seguem as linhas de fluxo. Deste modo, a eficiência de impactação é definida como a razão entre o número de partículas que entram e o número de partículas que são coletadas na superfície de impactação. A eficiência de coleta de cada superfície de impactação foi definida por (Hinds, 1982):

$$\varepsilon = \frac{\pi}{2} STK \quad 2.9$$

onde:

ε → eficiência de coleta da superfície de impactação;

STK → número de Stokes.

O número de Stokes é calculado pela equação (Hinds, 1982):

$$STK = \tau U \frac{1}{D_j/2} \quad 2.10$$

onde:

τ → tempo de relaxação da partícula;

U → velocidade do fluxo no orifício cilíndrico;

D_j → diâmetro do orifício cilíndrico.

Como τ depende do quadrado do diâmetro da partícula (equação 2.6), a eficiência de impactação será maior para as partículas maiores. Deste modo, as

curvas de eficiência teóricas dos impactadores apresentam a forma de uma função degrau, na qual todas as partículas maiores que o diâmetro de corte são coletadas. Experimentalmente as curvas de eficiência diferem em relação às curvas teóricas devido a flutuações no processo de coleta. O diâmetro de corte é definido como o diâmetro que corresponde a 50% da distribuição de frequência acumulada (Mercer, 1963; Hinds, 1982).

2.3 TRATO RESPIRATÓRIO

O sistema respiratório tem como função básica suprir o organismo com oxigênio e remover o metabólito gasoso, que é o gás carbônico. É, também, a via mais comum de entrada de substâncias tóxicas provenientes do meio ambiente.

O trato respiratório é dividido em 3 regiões: as vias aéreas superiores, a região traqueobronquial (T-B) e a região pulmonar (P).

2.3.1 VIAS AÉREAS SUPERIORES

Denominam-se vias aéreas superiores a parte do trato respiratório que começa nas fossas nasais e estende-se até a laringe. É onde ocorre a filtração das partículas de maior tamanho, a umidificação e o aquecimento do ar inspirado. Assim, o ar é acondicionado, protegido do ressecamento, do desequilíbrio térmico e evita-se o acesso das partículas maiores às regiões mais profundas do trato respiratório (Snipes, 1994; ICRP, 1994 a; Watson, 1983).

2.3.2 REGIÃO TRAQUEOBRONQUIAL (T-B)

A região traqueobronquial inicia-se na laringe e estende-se pela traquéia e outras passagens ciliadas, até os bronquíolos. Esta região é coberta pelo epitélio ciliado e por uma camada de muco. Partindo da traquéia, a árvore bronquiolar se divide progressivamente. A cada bifurcação do sistema há impactação de partículas. Devido à diminuição da velocidade do ar conduzido e à falta de sustentação aerodinâmica, as partículas em suspensão se depositam no muco que recobre esta região. Estas partículas são removidas em direção ao sistema digestivo, pelo movimento dos cílios que recobrem o epitélio bronquial. Assim, são removidas da região traqueobronquial, pela ação muco-ciliar, as partículas ali depositadas (Snipes,

1994; ICRP, 1994 a).

2.3.3 REGIÃO PULMONAR

A região pulmonar é caracterizada a partir da última ramificação dos bronquíolos e tem em seqüência os dutos alveolares, sacos alveolares, átrio, alvéolos, tecidos intersticiais, capilares alveolares, e o sistema linfático pulmonar. É nos alvéolos que ocorrem as trocas gasosas e onde as partículas podem ficar retidas por um longo período (Snipes, 1994).

2.4 DEPOSIÇÃO DE PARTÍCULAS INALADAS

As partículas inaladas são depositadas no trato respiratório após entrarem através do nariz ou boca. As propriedades aerodinâmicas que governam a deposição de partículas inaladas no trato respiratório estão associadas a processos físicos, anatômicos e fisiológicos que ocorrem durante o ciclo respiratório. A extensão da sedimentação, a impactação, a difusão e a precipitação eletrostática das partículas depositadas e o local de deposição dependem das propriedades físicas das partículas e de fatores biológicos, tais como a anatomia e geometria do trato respiratório (Snipes, 1994).

A trajetória da partícula inalada no trato respiratório, assim como a fração do material transportado pelo ar inalado depositada em cada região, são determinadas pelas características da partícula, que incluem tamanho, forma, densidade, grau de hidroscoopia e carga elétrica (Lippmann, 1970).

Devido às características de seletividade do trato respiratório, as partículas com diâmetro entre 3 e 4 μm são depositadas, preferencialmente, nas vias aéreas superiores e região traqueobronquial. As partículas com diâmetro abaixo de 2,5 μm são depositadas, preferencialmente, na região pulmonar (Lippmann, 1970; Lippmann & Albert, 1969; Chan & Lippmann, 1980, Task group, 1966).

As taxas de deposição das partículas variam de acordo com vários fatores, dentre eles idade, condições de respiração, volume respirado e se a respiração é oral ou nasal (Task group, 1966, ICRP, 1994 a).

A deposição pode ocorrer durante a inspiração ou expiração, e pode ser total ou regional. Observa-se que a maior fração do material inalado é depositado próximo

às bifurcações e entradas dos dutos alveolares (ICRP, 1994 a).

2.5 DEPURAÇÃO DE PARTÍCULAS INALADAS

Uma vez depositadas no trato respiratório, as partículas são removidas por dois mecanismos de depuração: o mecanismo físico e a dissolução-absorção (Snipes, 1994; ICRP, 1994a; Watson, 1983).

O processo mecânico (físico) é aquele no qual as partículas livres ou aquelas fagocitadas pelos macrófagos são removidas do trato respiratório (Snipes, 1994).

Não existe relação demonstrada entre o tamanho das partículas e processo de depuração física (Snipes, 1994).

O processo de depuração por dissolução-absorção é aquele no qual ocorre a dissociação dos constituintes da partícula. É necessário que haja a interação da partícula com os fluidos do corpo. A absorção ocorre como resultado da dissolução ou lixiviação da partícula, e é o fenômeno de transporte de transferência do material para o sistema linfático e circulatório (Snipes, 1994; ICRP, 1994a).

2.6 MODELOS PULMONARES

Para avaliar os riscos devido à incorporação de partículas, é necessário determinar as taxas de deposição, a concentração e a cinética destas partículas ao penetrarem no trato respiratório. O comportamento biocinético das partículas pode ser simulado matematicamente, através de um modelo levando em consideração as propriedades físicas das mesmas e as propriedades morfológicas e fisiológicas do trato respiratório. Tais modelos matemáticos foram desenvolvidos com base em dados experimentais com animais (Morgan et al., 1983; Barnes, 1971) e seres humanos (Lippmann & Albert, 1969; Lippmann, 1970).

2.6.1 MODELO PULMONAR SUGERIDO NA PUBLICAÇÃO 30 DA ICRP

O modelo adotado pela ICRP na publicação 30 (1979), divide o trato respiratório em três regiões: nasofaríngeal, traqueobronquial e pulmonar.

A região nasofaríngeal inicia-se nas narinas e estende-se até o nível da laringe ou epiglote. A região traqueobronquial consiste da traquéia e árvores bronquiais, incluindo os bronquíolos terminais. A região pulmonar é composta por bronquíolos

respiratórios. dutos alveolares. alvéolos e sacos alveolares (ICRP, 1979).

Este modelo inclui os mecanismos de depuração, os caminhos críticos e fornece informações sobre a deposição das partículas inaladas nas três regiões. A taxa de deposição das partículas, em cada uma das três regiões, está relacionada, dentre outros fatores, ao tamanho da partícula inalada. Na ausência de dados sobre o tamanho da partícula inalada, esta publicação recomenda que seja adotado o Diâmetro Aerodinâmico Mediano de Atividade (AMAD) igual a 1 μm , e a densidade da partícula igual a 1 (ICRP, 1979).

Os compostos inalados foram classificados em três grupos, de acordo com o tempo de retenção na região pulmonar. Os compostos classificados como D, W e Y possuem meias-vidas de depuração pulmonar menores que 10; entre 10 e 100 dias; e maiores que 100 dias, respectivamente. Os compostos classificados como Y são considerados insolúveis (ICRP, 1979).

2.6.2 MODELO PULMONAR SUGERIDO NA PUBLICAÇÃO 66 DA ICRP

Um novo modelo pulmonar foi apresentado pela ICRP, na publicação 66 (1994 a). Este modelo divide o trato respiratório em cinco regiões: a região extratorácica (ET); as regiões torácicas bronquial (BB), traqueobronquiolar (bb) e alveolar-intersticial (AI); os nódulos linfáticos extratorácicos (LN_{ET}) e torácicos (LN_{TH}). Esta divisão leva em consideração as diferenças funcionais, a deposição de partículas e as características do processo de eliminação do material inalado nos diversos componentes do trato respiratório (ICRP, 1994a).

Na Figura 2.2 é apresentado o esquema simplificado do trato respiratório.

A principal função da região extratorácica (ET) é a limpeza e condução do ar inspirado para a traquéia e pulmões. É formada pelo nariz (ETA_1) e pela passagem nasal posterior, laringe, faringe e boca (ETA_2) (ICRP, 1994a).

Em condições normais de respiração nasal, o ar inspirado move-se através do nariz e da faringe para dentro da laringe. No caso de obstrução nasal, ou quando a ventilação necessita de excesso da capacidade nasal, o trajeto auxiliar é a boca, faringe e laringe (ICRP, 1994a).

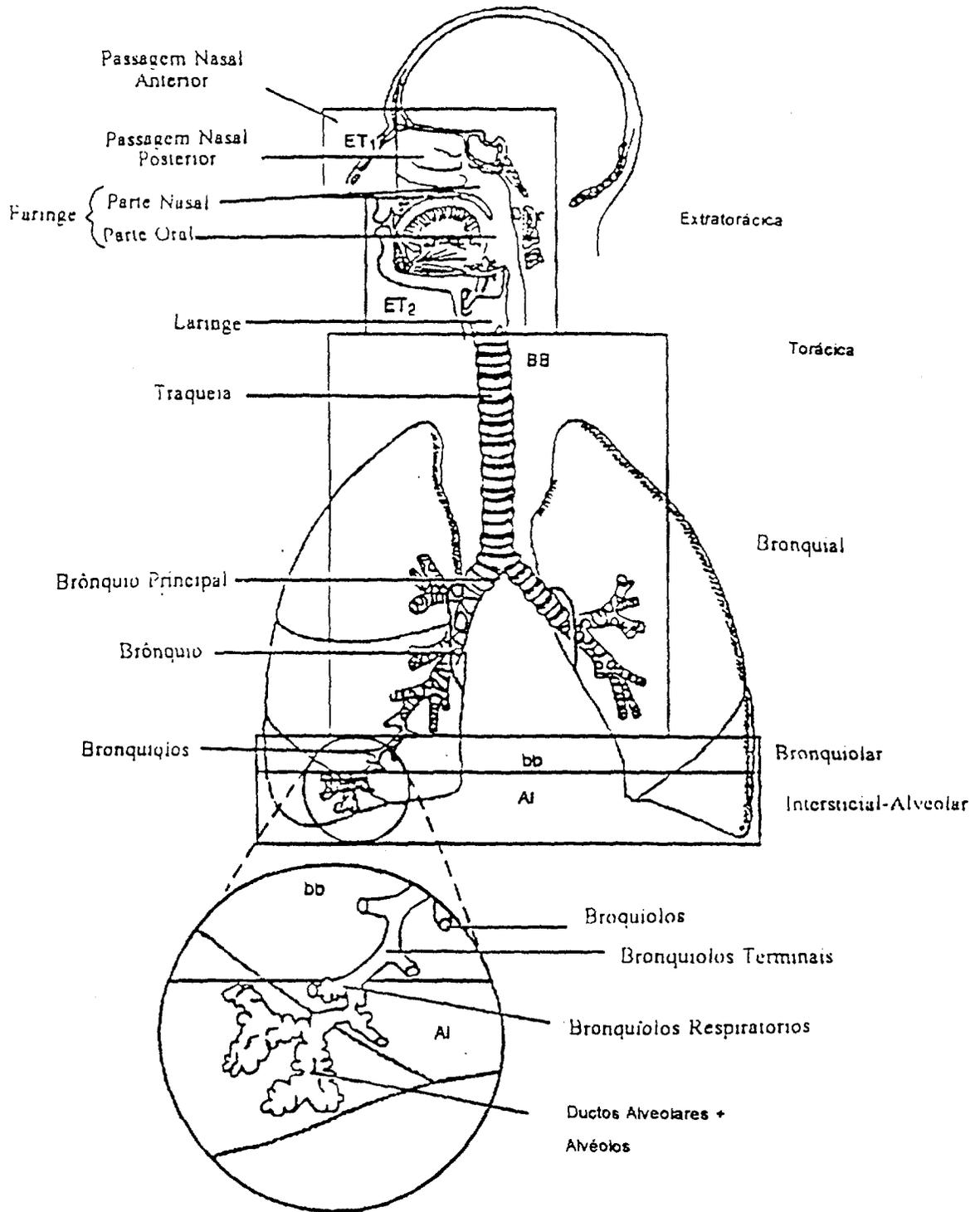


Figura 2.2 Esquema simplificado do trato respiratório.

A região torácica bronquial (BB) é parte do sistema de condução de ar para a região inferior do tórax, consistindo em traquéia, brônquios principais e bronquíolos intrapulmonares. A função principal desta via aérea é conduzir o ar, ajustando a

umidade e temperatura do ar inspirado. A partícula inalada é depositada por impactação, sedimentação ou difusão. Esta região também inclui nódulos e vasos linfáticos (ICRP, 1994a).

As regiões torácica bronquiolar (bb) e alveolar intersticial (AI) compreendem os bronquíolos, os bronquíolos respiratórios, os dutos alveolares e sacos alveolares. Estas regiões também incluem os nódulos linfáticos.

O modelo apresentado pela ICRP, na publicação 66 (ICRP, 1994a), também relaciona a deposição das partículas, em cada uma das regiões, ao tamanho da partícula inalada. Os parâmetros que caracterizam a deposição das partículas são o AMAD (Diâmetro Aerodinâmico Mediano de Atividade) e o AMTD (Diâmetro Termodinâmico Mediano de Atividade).

Na ausência de dados sobre o tamanho da partícula inalada, esta publicação recomenda que devem ser adotados os seguintes parâmetros (ICRP, 1994a):

- i- AMAD = 5 μm ($\sigma_g = 2,5$) para exposição ocupacional;
- ii- AMTD = 1 μm ($\sigma_g = 2,47$) para público em geral;
- iii- densidade da partícula igual a 3 g/cm^3 ;
- iv- fator de correção de forma aerodinâmico igual a 1,5.

2.7 MODELO BIOCINÉTICO PARA TÓRIO

A ICRP sugeriu um modelo compartimental para representar o corpo humano. Após a incorporação do radionuclídeo por ingestão, inalação ou através da pele, uma fração será transferida para os fluidos biológicos (compartimentos de transferência), caracterizando uma incorporação sistêmica. A partir daí, pode-se depositar, temporariamente, em vários compartimentos, até ser eliminado pelas fezes, urina ou sudorese (ICRP, 1979).

No modelo proposto pela ICRP em 1979 (ICRP, 1979), não foi considerada a recirculação do sangue mas no modelo apresentado em 1994 a ICRP a considera (ICRP, 1994b).

2.7.1 MODELO BIOCINÉTICO PARA O TÓRIO PROPOSTO NA PUBLICAÇÃO 30 DA ICRP

O modelo de retenção para o tório sugerido pela ICRP na sua publicação 30

(ICRP, 1979) baseou-se principalmente em estudos realizados por Stover e colaboradores (Stover et al., 1960) com cães da raça *beagle* que foram injetados com ^{228}Th . Foi proposto na publicação 30 da ICRP (ICRP, 1979) o seguinte modelo metabólico para o tório: a partir da entrada do tório no compartimento de transferência, considera-se que uma fração igual a 70% é depositado no tecido ósseo, onde o Th é retido com uma meia-vida biológica de 8 000 dias. No fígado, deposita-se uma fração igual a 4%, e meia-vida biológica de retenção é de 700 dias. Considera-se que uma fração igual a 16% distribui-se uniformemente pelo resto do corpo, de onde o nuclídeo é removido com meia-vida biológica de 700 dias. Assume-se que os 10% restantes que penetram no compartimento de transferência são removidos diretamente por excreção, e que a meia-vida biológica de remoção deste compartimento é meio-dia (ICRP, 1979).

2.7.2 MODELO BIOCINÉTICO PARA O TÓRIO PROPOSTO NA PUBLICAÇÃO 69 DA ICRP

Com base nos conhecimentos atuais sobre o comportamento dos actinídeos e na semelhança entre o comportamento do tório e do plutônio, foi proposto um novo modelo para descrever o comportamento biocinético do tório (ICRP, 1994b).

O esquema simplificado do modelo biocinético para tório é apresentado na Figura 2.3.

Neste modelo, o sangue (compartimento de transferência) é representado como um compartimento uniforme. Os fluidos extracelulares estão incluídos no compartimento STO, que representa a fase rápida de trocas de material entre o sangue e os tecidos.

O esqueleto é representado por duas frações: cortical e trabecular, cada uma delas subdividida em superfície óssea, volume do osso e medula óssea. Com base nos estudos feitos com cães da raça *beagle* injetados com tório, e nos dados de autópsia de seres humanos cronicamente expostos a tório, considera-se que cerca de 70% do tório que deixa a circulação é depositado na superfície óssea. Destes, metade se deposita na superfície cortical e metade na superfície trabecular. Para adultos, a meia vida biológica do tório no volume do osso cortical é 8 440 dias.

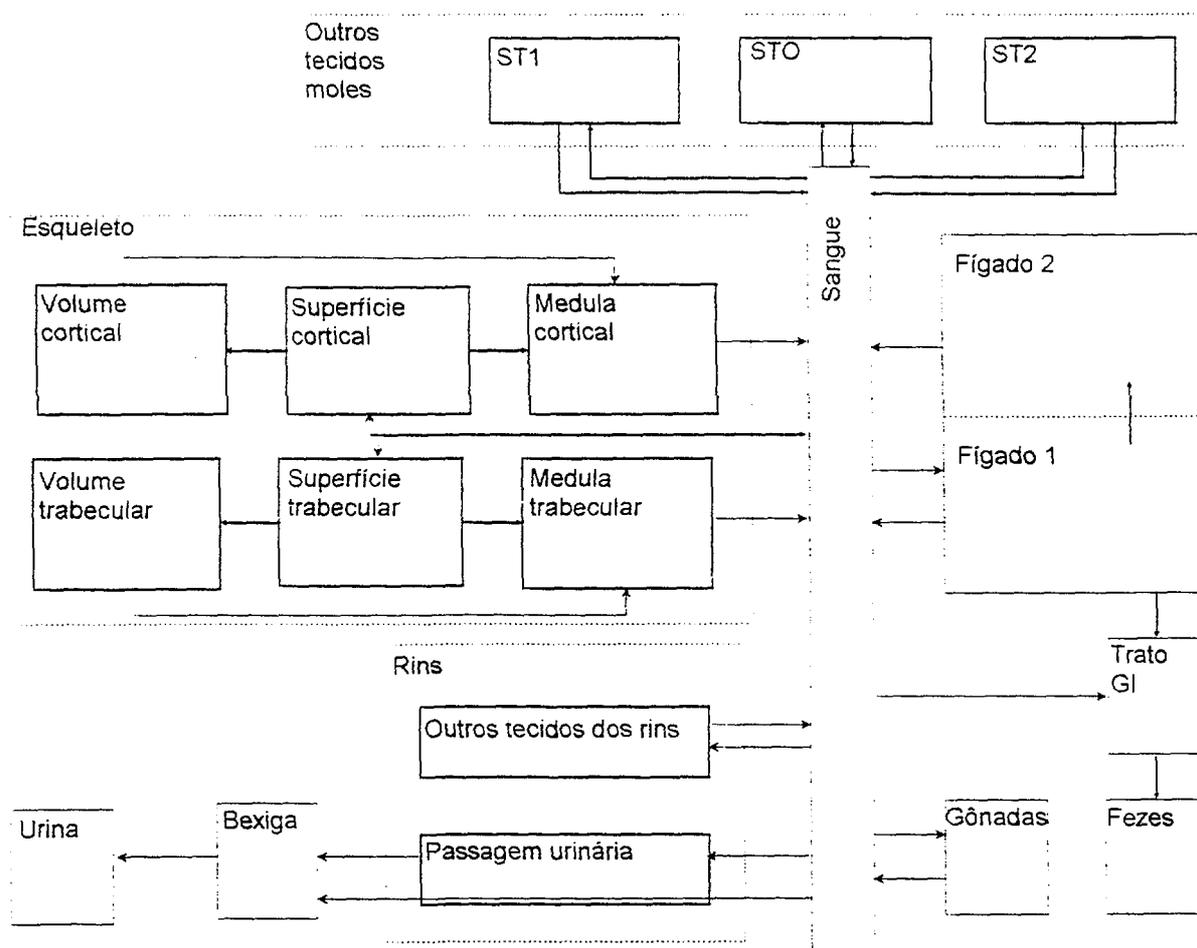


Figura 2.3 Esquema simplificado do modelo biocinético para tório, proposto na publicação 69 da ICRP.

O modelo adotado para descrever a translocação no esqueleto é igual aos sugeridos para Pu, Am e Np, descritos nas publicações 56 (ICRP,1989) e 67 (ICRP,1993) da ICRP. De acordo com estes modelos, o coeficiente de transferência de tório, entre os compartimentos do osso é controlada pelo processo de reestruturação óssea. A meia-vida biológica do tório na medula óssea é de 0,25 anos; o tório é transferido para o sangue e então redistribuído pelo corpo. Este valor foi originalmente derivado dos dados de Pu e baseiam-se nos estudos feitos com cães da raça *beagle* e estão de acordo com as recentes medidas de Am e Pu no osso e na medula de seres humanos expostos ocupacionalmente a Pu e Am. Existe uma dependência da idade na biocinética do tório. Esta diferenciação ocorre até 25 anos, devido às taxas de formação óssea, que são elevadas até a primeira parte da terceira década de vida.

Neste modelo, o fígado é representado por dois compartimentos (Fígado 1 e

Fígado 2). Assume-se que 5% da atividade presente no sangue seja depositada no Fígado 1, onde fica retida com uma meia-vida de 1 ano, que é o valor usado na modelagem dos transurânicos (ICRP, 1993). Da atividade que deixa o Fígado 1, assume-se que 50% é transferido para o Fígado 2; 25% para o sangue; e 25% para o trato gastrointestinal. O tório que deixa o Fígado 2 retorna para o sangue com meia-vida biológica de 9 anos (ICRP, 1993). O modelo prevê que o fígado, durante uma exposição crônica, contenha 3 - 4% do conteúdo sistêmico total.

No modelo proposto na publicação 69 da ICRP (ICRP, 1994b), 5% do Th no compartimento de transferência é excretado via fezes rapidamente através da transferência direta do sangue para o trato gastrointestinal. Através da secreção biliar do fígado (Fígado 1) para o trato gastrointestinal, o tório também é excretado via fezes numa taxa bem mais lenta. Especificamente, a fração que deixa o Fígado 1 é transferida via secreção biliar para o intestino delgado e é de 25%. O tório que entra no intestino delgado está disponível para reabsorção pelo sangue com a mesma fração de absorção de quando ingerido diretamente. Os valores de fração de absorção do trato gastrointestinal (f_1), disponíveis na literatura têm uma grande variação: para os adultos variam de 10^{-5} à 10^{-2} (Maletskost et al., 1969; Dang & Sunta, 1990; Dang et al., 1992). Recentes dados de absorção de tório, plutônio, neptúnio, amerício e cúrio obtidos de estudos com seres humanos voluntários, mostram que o valor de f_1 é da ordem de 5×10^{-4} . Este valor é adotado pela publicação 69 da ICRP (1994) para todas as faixas etárias, exceto para recém-nascidos, que é 5×10^{-3} .

O rim é representado por dois compartimentos, dos quais um libera o tório para a urina e outro retorna o tório para o sangue. A bexiga urinária é representada por um terceiro compartimento, que recebe todo o material destinado à excreção pela urina.

Este modelo assume que 5,5% da atividade que deixa a circulação vai diretamente para a bexiga, e que outros 3,5% se depositam nos túbulos renais e são liberados para a bexiga com meia-vida de 15 dias. Para uma exposição crônica (mais especificamente, absorção constante pelo sangue de fontes externas), este modelo prevê que a excreção diária de tório é cerca de 17% do conteúdo do sangue.

Os compartimentos de tecido mole ST1 e ST2 são usado para representar a retenção intermediária (até poucos anos) e a retenção longa (muitos anos) respectivamente.

Neste modelo, 0,035% do tório que deixa a circulação se deposita nos 35 g dos testículos do homem e 0,011 g nos cerca de 11 g dos ovários da mulher adulta (ICRP, 1975). A meia-vida de remoção das gônadas para o sangue é 10 anos.

CAPÍTULO 3

DESENVOLVIMENTO DO IMPACTADOR EM CASCATA NACIONAL

Os impactadores em cascata disponíveis comercialmente não selecionam as partículas dos aerossóis nas frações respirável e inalável (Marple & Willeke, 1975; IAEA, 1978; Hinds, 1982; Lippmann, 1989a). Deste modo, optou-se por desenvolver o projeto de um impactador em cascata nacional (ICN). A razão fundamental deste projeto foi: desenvolver um impactador nacional que selecionasse as partículas nas frações respirável e inalável, simulando a deposição no trato respiratório superior e na região pulmonar.

O projeto baseou-se nos impactadores do tipo Batelle, que são impactadores de um único orifício por estágio (Mitchel & Pilcher, 1959). O ICN foi projetado na CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear) e construído na Fábrica de Elemento Combustível da INB (Indústrias Nucleares Brasileiras), pois a confecção deste equipamento requer medidas com algarismo significativos até a terceira casa decimal em milímetros. Ele foi confeccionado em aço inoxidável (360-ACESITA). As principais vantagens do uso desse material foi permitir que as paredes internas do impactador recebessem acabamento superficial espelhado e permitir que o impactador pudesse ser usado em ambientes com atmosferas ácidas.

O ICN possui 6 estágios. Cada estágio possui um único orifício, sendo a superfície impactadora um filme de Mylar ($C_{10}H_8O_4$) com 2 μm de espessura, permitindo que as amostras sejam analisadas pelo método PIXE, (*Particle Induced X rays Emission*) (Anexo 1). Este foi escolhido como método para identificar e quantificar os elementos nas amostras depositadas em cada estágio do impactador. Assim, as superfícies impactadoras do novo impactador em cascata possibilitam a análise das amostras pelo método PIXE, sem prévio manuseio, usando o arranjo experimental descrito no Capítulo 5.

O ICN foi projetado para coletar partículas com diâmetro aerodinâmico mediano entre 0,64 e 19,9 μm . Os diâmetros de corte do segundo e quarto estágios separam

as frações inalável e respirável dos aerossóis. Como o diâmetro de corte do sexto estágio é igual a 0,64 µm, este estágio separa as partículas sólidas das partículas gasosas (Hinds, 1982). As partículas menores que o diâmetro de corte do último estágio do impactador são coletados no filtro final. O diâmetro do filtro final é 3,7 cm, e está localizado entre o sexto estágio e o orifício crítico. O orifício crítico garante a vazão constante nos estágios do impactador, sendo seu diâmetro 1,10 mm.

Os diâmetros de corte do impactador foram calculados para uma vazão operacional de 12 l/min. A variação da vazão induz modificações no diâmetro de corte de cada estágio. Uma variação de 16,7% na vazão ocasiona uma variação, no mesmo sentido, de 8% nos diâmetros de corte. A vazão máxima, correspondente a um fluxo subsônico, é 18,9 l/min.

3.1 CÁLCULO DOS DIÂMETROS DE CORTE

3.1.1 CÁLCULO TEÓRICO DO DIÂMETRO DE CORTE DOS ESTÁGIOS

O diâmetro de corte do estágio de um impactador, D_{50} , é definido como o diâmetro da partícula que corresponde a 50% da distribuição das partículas coletadas neste estágio.

Os diâmetros de corte teóricos, de cada estágio, foram calculados baseando-se na equação de Marple (Hinds, 1982; Marple et al., 1974; Marple & Willeke, 1975), que relaciona o número de Stokes com os parâmetros do impactador. Deste modo, o diâmetro de corte (D_{50}) para cada estágio do impactador em cascata nacional (ICN) foi calculado usando a equação de Marple abaixo:

$$D_{50} \sqrt{C_c} = \left(\frac{9\eta D_j/2 STK_{50}}{\rho_p U} \right)^{1/2} \quad 3.1$$

onde:

D_{50} → diâmetro de corte para a superfície de impactação (µm);

D_j → diâmetro do orifício de saída do impactador (mm);

STK_{50} → número de Stokes;

U → velocidade média do fluido na saída do orifício com diâmetro D_j (cm/s)

η → viscosidade do ar (kgf.s/m²);

ρ_p → densidade da partícula (g/cm^3);

C_c → fator de correção de Cunningham.

Neste cálculo, foram usadas as dimensões reais do impactador em cascata nacional (ICN), após a confecção, e considerando-se as incertezas associadas à execução mecânica do projeto. Na determinação do diâmetro de corte de cada estágio, não foi considerada a interferência do estágio anterior, pois resultados de estudos encontrados na literatura indicam que esta interferência pode ser desprezada no cálculo da eficiência de cada estágio (Pessôa, 1987).

Esta equação foi resolvida numericamente, possibilitando a solução para as condições de pressão e temperatura nas quais foram coletadas as amostras.

Os valores do número de Stokes usados na solução da equação 3.1 foram obtidos da literatura (Marple & Willeke, 1975). O número de Stokes está relacionado ao número de Reynold. Para cada estágio do impactador, foi determinado o número de Reynold correspondente. A velocidade do fluxo em cada estágio do impactador foi determinada considerando a vazão do impactador e a área do orifício.

Os parâmetros importantes na determinação do diâmetro de corte de cada estágio são:

i- velocidade média do fluxo de ar no orifício de cada estágio (U) e

ii- distância da saída do orifício ao prato de impactação (Hinds, 1982; Marple & Willeke, 1975).

A variação de pressão em cada estágio do impactador foi estimada teoricamente, usando-se equações da conservação de energia (Streeter, 1979).

Os valores de D_{50} , adotados como valores de calibração do ICN, foram determinados para condições normais de pressão, temperatura e umidade do ar a nível do mar (Zemasky, 1957). A densidade da partícula foi considerada igual a 1 g/cm^3 e vazão operacional de 12 l/min . Estes valores são apresentados na Tabela 3.1.

Os principais parâmetros de projeto usados na calibração teórica do impactador são também apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Principais parâmetros de construção do impactador em cascata nacional.

Parâmetros de construção						
Estágio	D_j (mm)	U (cm/s)	S (mm)	L (mm)	D_{50} (μ m)	PRESSÃO (atm)
1	14,01	134	10,6	13,2	19,4	1,0
2	9,01	343	8,74	12,0	9,9	1,0
3	5,53	854	7,62	10,0	4,7	1,0
4	3,52	2 152	6,78	9,0	2,4	0,998
5	2,02	5 261	6,30	7,5	1,0	0,977
6	1,49	11 318	6,22	7,5	0,64	0,922

S = distância do orifício ao prato. D_j = diâmetro do orifício. D_{50} = diâmetro de corte.
L = comprimento do orifício. U = velocidade do fluxo de ar no orifício.

Na Figura 3.1 é mostrada uma fotografia do ICN desmontado, mostrando os diâmetros dos orifícios do 1° ao 6° estágio (D_j); os pratos usados como suporte das superfícies impactadoras e caixa para transporte das amostras.

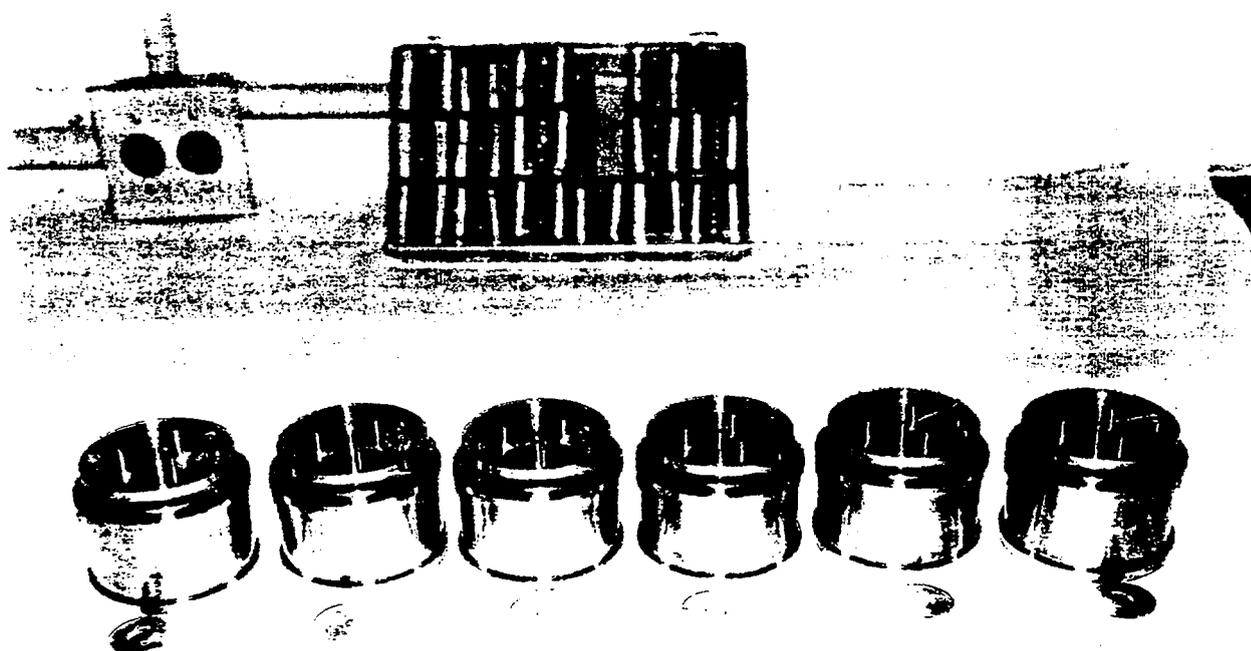


Figura 3.1 ICN desmontado, mostrando os orifícios de cada estágio, os suportes das superfícies impactadoras e caixa de transporte de amostras.

Na Figura 3.2 é apresentado o corte do impactador em cascata.

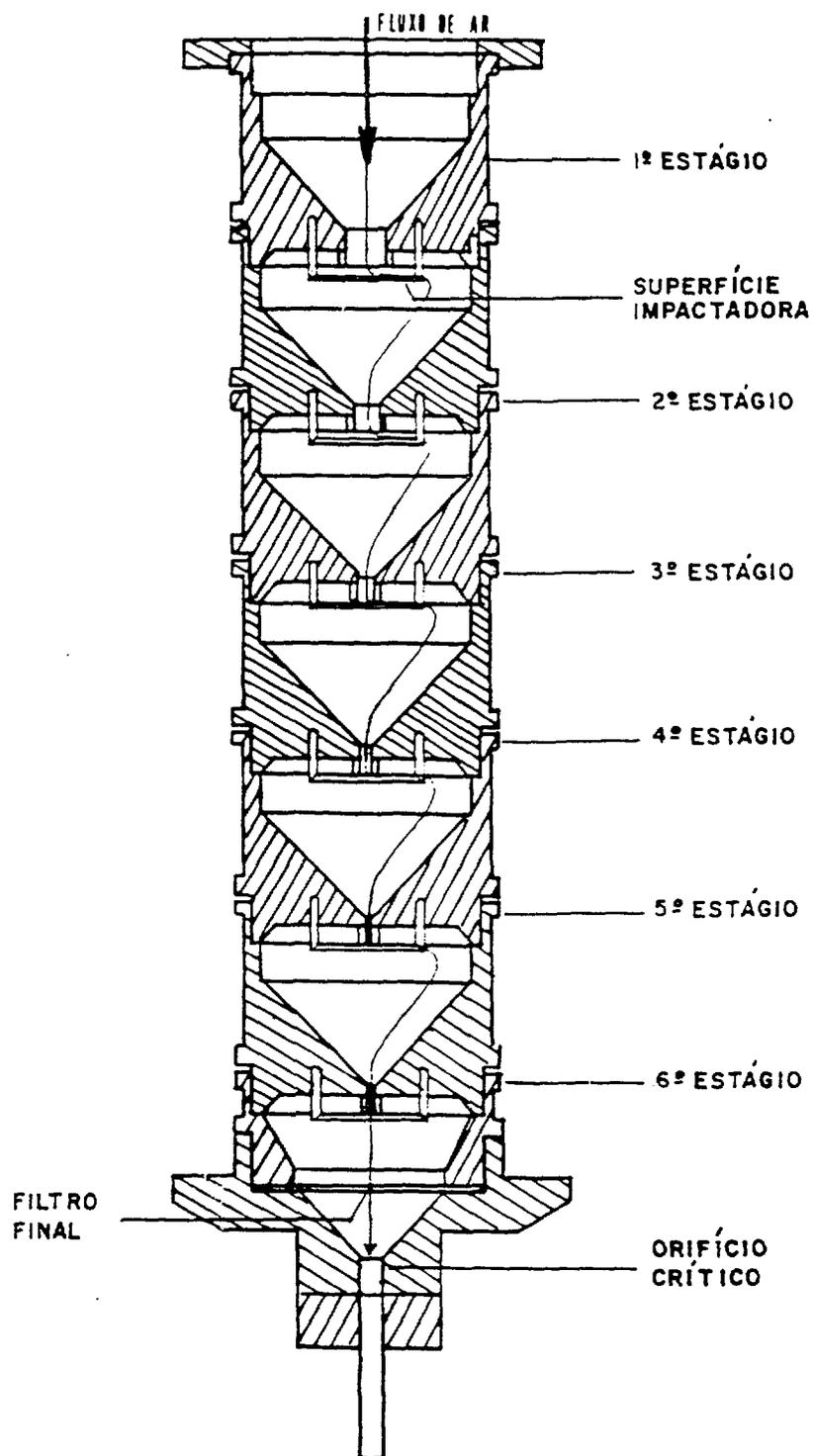


Figura 3.2 Corte do impactador em cascata nacional (ICN).

3.2 DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO DIÂMETRO DE CORTE

O diâmetro de cada estágio é o diâmetro da partícula que corresponde a 50% da curva de eficiência determinada para o estágio.

Embora o diâmetro de corte seja determinado teoricamente para cada estágio do impactador, este parâmetro pode ser modificado devido a:

- i) incertezas associadas ao projeto;
- ii) desvio de partículas para estágios inferiores; coleta de partículas menores que o diâmetro de corte do estágio;
- iii) desvios de deposição devido à carga eletrostática das partículas;
- iv) perda de partículas que ficam depositadas nas paredes do impactador (Hinds, 1982; Rao & Whitby, 1978 a e b; Oodo et al., 1981, Hering et al. 1978).

Para confirmar o valor teórico determinado para o diâmetro de corte do estágio, é necessário fazer a calibração experimental.

A calibração experimental do ICN foi realizada no "I. L. Lanza Laboratory", da Universidade de Nova Iorque. A calibração experimental de todos os estágios de um impactador é complexa e requer muito tempo. Devido ao fator tempo, só foi possível a calibração de um único estágio, o sexto.

Contudo a calibração experimental deste estágio é suficiente para testar o modelo desenvolvido para a calibração teórica dos demais estágios. A calibração experimental do sexto estágio é complexa. Uma das principais dificuldades é a produção de partículas monodispersas com diâmetro na fração desejada, necessária à calibração.

O sexto estágio do ICN separa as partículas de poeira das gasosas. O seu D_{50} calculado é 0,6435 μm . A velocidade do fluido na saída do orifício é cerca de um terço da velocidade do som, e a pressão é menor que a atmosférica (Tabela 3.1). Estas condições operacionais podem ocasionar variações entre o D_{50} calculado e o real. Para determinar a variação entre o valor de D_{50} calculado e o real, foi necessário realizar uma calibração experimental, deste estágio. Esta calibração possibilitou determinar o D_{50} real do estágio e testar sua calibração teórica. Como este é o último estágio do impactador, a faixa de tamanho de partículas amostradas depende do diâmetro de corte dos estágios superiores.

3.2.1 ARRANJO EXPERIMENTAL PARA CALIBRAÇÃO

O valor do diâmetro de corte calculado para o sexto estágio (usando-se a equação 3.1) foi $0,643 \mu\text{m}$. Deste modo, para se obter a curva de eficiência experimental deste estágio foram determinadas as eficiências de retenção de partículas na faixa de $0,3$ a $2,2 \mu\text{m}$.

Na calibração experimental do impactador foram usadas gotas líquidas esféricas de tamanho uniforme. O tamanho da partícula gerada depende do tipo de gerador usado, da concentração da solução e da pureza do solvente (Willeke & Baron, 1993; Hinds, 1982).

Foram usados dois arranjos experimentais para gerar partículas na faixa de $0,3$ a $2,2 \mu\text{m}$. O primeiro arranjo gerou partículas entre $0,3$ e $0,7 \mu\text{m}$; o segundo na faixa de $0,8$ a $2,2 \mu\text{m}$.

O primeiro arranjo experimental é apresentado na Figura 3.3.

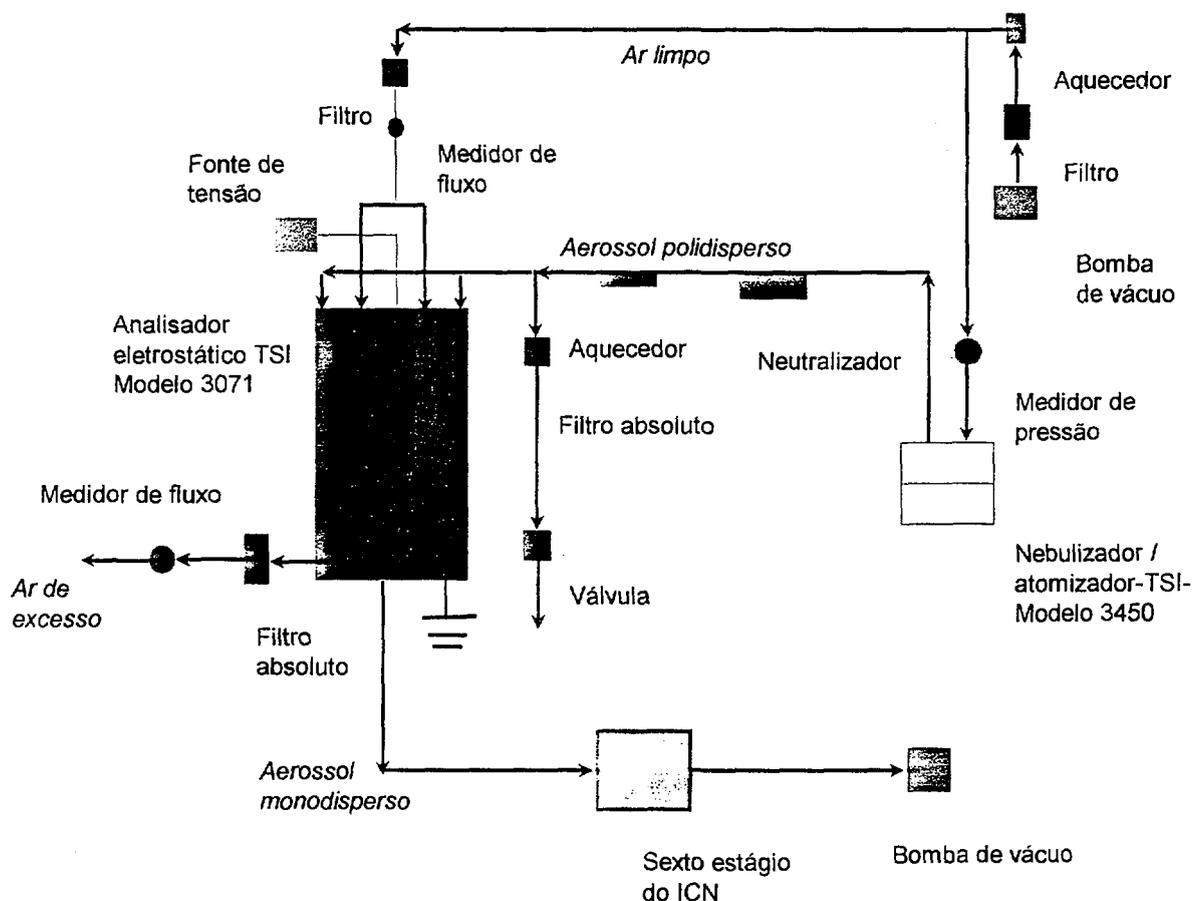


Figura 3.3 Arranjo experimental usando para gerar partículas na faixa de $0,3$ a $0,7 \mu\text{m}$.

Este arranjo foi usado para gerar partículas na faixa de 0,3 a 0,7 μm . O jato de ar seco foi introduzido no atomizador, dentro do nebulizador com a solução de ácido oleico marcado com nitrato de uranila. O aerossol polidisperso produzido pelo atomizador/nebulizador passava por um aquecedor para retirar o excesso de umidade e em seguida por um neutralizador de carga eletrostática. Este fluxo de aerossol foi introduzido na parte superior do Analisador de Mobilidade Diferencial (DMA), junto com o ar seco e limpo. A barra central do DMA era aplicada a tensão determinada pela calibração para separar as partículas com diâmetro desejado. As partículas com o diâmetro desejado deixam o classificador na saída de fluxo monodisperso. As maiores deixam o classificador na saída de fluxo de excesso e as menores eram desviadas para a barra central do DMA.

Cada equipamento usado no arranjo experimental para gerar as partículas no intervalo de 0,3 a 0,7 μm é descrito abaixo.

1 - Nebulizador/atomizador

As partículas foram geradas por um nebulizador atomizador (TSI modelo 3075) Hinds, 1982; Lippmann, 1989b; Mercer, 1973; Berglund et al., 1973; Kunston, 1976; TSI-3071, 1985). A atomização de soluções com ar comprimido é um dos modos mais simples de gerar aerossóis. O ar comprimido é introduzido no atomizador, imerso na solução de ácido oléico com nitrato de uranila dentro do nebulizador. O ar comprimido sai através de pequenos orifícios a alta velocidade no líquido. As gotas de líquido produzidas são misturadas com o ar seco, resultando em partículas de resíduo sólido após evaporação. Variando a concentração do soluto não volátil na solução é possível gerar aerossóis na faixa de 0,01 a 1 μm , com desvio padrão geométrico (σ_g) em torno de 2 (Willeke & Baron, 1993).

A variação na concentração da solução é uma das principais fontes de incertezas na geração de aerossóis. Esta variação é devido, principalmente, a evaporação do solvente e às partículas geradas que não deixam o nebulizador e retornam à solução, aglutinando-se a outras partículas. A troca constante da solução é o meio mais eficiente para garantir a concentração desejada.

Foram usadas soluções com concentrações diferentes para gerar aerossóis em diferentes faixas de tamanho. A concentração da solução foi ajustada de tal modo que

o diâmetro mediano do aerossol polidisperso gerado fosse o mesmo que o do aerossol monodisperso. Para assegurar a geração de partículas no tamanho desejado, a solução era trocada periodicamente, para manter a concentração constante e evitar a modificação da distribuição de tamanho das partículas durante o experimento (Hinds, 1982).

2 - Neutralizador de carga

Os aerossóis possuem mais de uma unidade de carga elétrica, devido à colisão randômica com os íons do ar. No meio ambiente, as partículas são neutralizadas pela captura de íons de polaridade diferentes. No caso de aerossóis artificiais, as partículas são neutralizadas, forçando o aerossol a passar por uma região ionizada (Hinds, 1982; Lui & Pui, 1974). Foi usado o Neutralizador de Aerossol da TSI, modelo 3077. Os íons negativos e positivos foram gerados usando uma fonte de ^{85}Kr (2 mCi), contida em uma pequena cápsula de aço inoxidável (TSI-3071, 1985).

3 - Analisador de Mobilidade Diferencial - DMA

A distribuição de carga das partículas do aerossol, ao atingir o estado de equilíbrio, apresenta a forma de uma distribuição de Boltzmann (Hinds, 1982; Willeke & Baron, 1993; TSI-3071, 1985; Lui & Pui, 1975). As partículas de aerossol adquirem carga devido à colisão com íons existentes no ar. Assim, as partículas neutras são raramente encontradas. Deste modo, quando uma partícula é colocada em um campo elétrico, sofre a ação de uma força gerada por este campo.

A partícula é acelerada neste campo até atingir a sua velocidade terminal elétrica, que é função do campo elétrico que atua na partícula e de sua mobilidade elétrica. A mobilidade elétrica, por sua vez, está associada ao diâmetro da partícula e à sua carga elétrica. Assim, é possível classificar aerossóis com carga unitária em função de sua mobilidade elétrica (Hinds, 1982; Willeke & Baron, 1993; TSI-3071, 1985).

O aerossol polidisperso gerado foi neutralizado, para que suas partículas perdessem o excesso de carga. Deste modo, a distribuição de carga do aerossol atinge a condição de equilíbrio, ou seja, a forma de uma distribuição de Boltzmann. A separação de cada uma das distribuições de tamanho foi realizada usando um

classificador eletrostático do tipo diferencial (TSI modelo 3071), para obter um aerossol monodisperso (Hinds, 1982; Willeke & Baron, 1993; TSI-3071, 1985).

O aerossol polidisperso penetra na parte superior do amostrador, junto com o ar limpo. Na barra coletora localizada no centro do equipamento, é aplicada uma voltagem que irá variar de acordo com o tamanho que se deseja obter. As partículas com mobilidade menor que a mobilidade de corte, determinada pela voltagem aplicada à barra coletora, são eliminadas no fluxo de excesso. As partículas com mobilidade maior são coletadas na parte superior da barra e somente aquelas com a mobilidade desejada saem no fluxo de aerossol monodisperso (Hinds, 1982; Willeke & Baron, 1993).

A determinação do valor da mobilidade, para cada tamanho de partícula, depende da taxa de fluxo e das dimensões do equipamento usado. A mobilidade para cada diâmetro de partícula foi determinada usando a equação abaixo (TSI-3071, 1985):

$$Z_p = \frac{q_t - \frac{1}{2} (q_s + q_a) \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi V L} \quad 3.2$$

onde:

Z_p → mobilidade elétrica da partícula ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$);

q_t → fluxo total (cm^3/s);

q_a → fluxo do aerossol (cm^3/s);

q_s → fluxo do aerossol monodisperso (cm^3/s);

r_1 → raio do cilindro interno (0,937 cm);

r_2 → raio do cilindro externo (1,958 cm);

V → voltagem aplicada na barra coletora (volt);

L → comprimento da barra coletora entre a entrada de ar e o desvio (44,44 cm)

A variação máxima da mobilidade no classificador eletrostático é calculada através da equação:

$$\Delta Z = \frac{(q_a + q_s) \ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi V L} \quad 3.3$$

onde q_a , q_s , r_1 , r_2 , V e L foram definidos acima.

O fluxo no interior do equipamento é constante. Deste modo, a soma do fluxo de ar limpo (q_c) com o fluxo de aerossol polidisperso (q_a) deve ser igual a soma do fluxo de ar de excesso (q_e) com o fluxo de aerossol monodisperso (q_s). Assim:

$$q_t = q_c + q_a = q_e + q_s \quad 3.4$$

onde q_t é a soma de fluxo total do classificador eletrostático.

Fazendo $q_c = q_a = q_s$, e substituindo-o na equação 3.2, e ainda considerando-se $q_c = q_t - q_a$, a mobilidade elétrica pode ser determinada em função do fluxo de ar limpo, através da seguinte equação:

$$Z_p = \frac{q_c \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)}{2\pi V L} \quad 3.5$$

onde:

Z_p → mobilidade elétrica da partícula ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$);

q_c → fluxo de ar limpo (cm^3/s);

r_1 → raio do cilindro interno (0,937 cm);

r_2 → raio do cilindro externo (1,958 cm);

V → voltagem aplicada na barra coletora (volt);

L → comprimento da barra coletora entre a entrada de ar e o desvio (44,44 cm).

Para o cálculo da eficiência de retenção das partículas foram selecionados sete diâmetros de partículas entre 0,3 e 0,7 μm . A mobilidade eletrostática correspondente a cada tamanho de partícula foi a fornecida pelo fabricante do classificador eletrostático (TSI-3071, 1985). Substituindo-se os valores da mobilidade, as

dimensões do classificador e a tensão aplicada (na equação 3.5), foram determinados os valores do fluxo de operação do classificador, para cada tamanho de partícula (TSI-3071, 1985). Nestes cálculos, a tensão aplicada à barra foi 9 000 V, mantida constante. Os valores calculados para o fluxo de aerossol polidisperso variaram de 165,24 cm³/s (10 l/min), para partículas de 0,3 µm, até 47,57 cm³/s (3 l/min), para partículas de 0,8 µm. Na Tabela 3.2 são apresentados os valores dos fluxos calculados para cada tamanho de partícula selecionado.

Tabela 3.2 Valores do fluxo de aerossol polidisperso mantendo constante a tensão aplicada a barra coletora em 9 000 V.

DIÂMETRO DA PARTÍCULA (µm)	MOBILIDADE 10 ⁻⁵	FLUXO DO AEROSSOL (cm ³ /s)
0,3	4,846	165,24
0,4	3,284	111,98
0,5	2,466	84,09
0,6	1,968	67,11
0,7	1,634	55,72
0,8	1,395	47,57

Para a calibração, optou-se por manter o fluxo de operação do classificador constante e variar a tensão aplicada à barra coletora. Como fluxo de operação do classificador eletrostático, foi escolhido o menor fluxo calculado, mantendo constante a tensão aplicada. O menor fluxo calculado foi 3 l/min e correspondeu à partícula com diâmetro de 0,8 µm. Substituindo os valores na equação 3.5, foi calculada a tensão que deveria ser aplicada à barra coletora para cada tamanho de partícula. Na Tabela 3.3 são apresentados os valores da tensão aplicada à barra, mantendo o fluxo constante em 3 l/min para cada tamanho de partícula.

O analisador classificador possui duas entradas e duas saídas de aerossol. Todos os fluxos são regulados por válvulas, que são ajustadas para as vazões desejadas.

Tabela 3.3 Valores da tensão aplicada na barra coletora para um fluxo polidisperso constante igual a 3 l/min

DIÂMETRO DA PARTÍCULA (μm)	MOBILIDADE 10^{-5}	TENSÃO (V)
0,3	4,846	2 591
0,4	3,284	3 823
0,5	2,466	5 091
0,6	1,968	6 380
0,7	1,634	7 684
0,8	1,395	9 000

Os fluxos de ar limpo, de excesso e monodisperso foram controlados por válvulas elétricas. A tensão a ser aplicada a cada uma destas válvulas foi determinada experimentalmente. A tensão aplicada a cada uma das válvulas foi variando lentamente enquanto era medido o fluxo medido. Foram obtidas três curvas de variação da tensão aplicada a cada válvula em relação ao fluxo. Estas curvas são apresentadas nas Figuras 3.4, 3.5, 3.6. A tensão a ser aplicada a cada válvula foi determinada pelo ponto, em cada curva, que correspondeu à vazão de 3 l/min.

Após o ajuste das tensões aplicadas às válvulas controladora de fluxo, que foram mantidas constantes em todas as medidas, foi aberta a válvula de fluxo polidisperso. A tensão aplicada à barra central do classificador foi variada lentamente e determinada a concentração de partículas por faixa de tamanho.

A concentração de partículas com os diâmetros selecionados em cada solução usada, e o controle desta distribuição ao longo do experimento, foram feitos usando o Contador de Partículas de Condensação Ultrafina-CPC. No arranjo experimental foi usado o CPC da TSI, modelo 3025 (TSI-3025/3027, 1985), que usa o princípio da difusão térmica. Este equipamento possui alta sensibilidade, possibilitando contar partículas abaixo de $0,01 \mu\text{m}$. A faixa de operação do CPC varia de $0,01$ a $9,99 \times 10^4$ partículas/cm³.

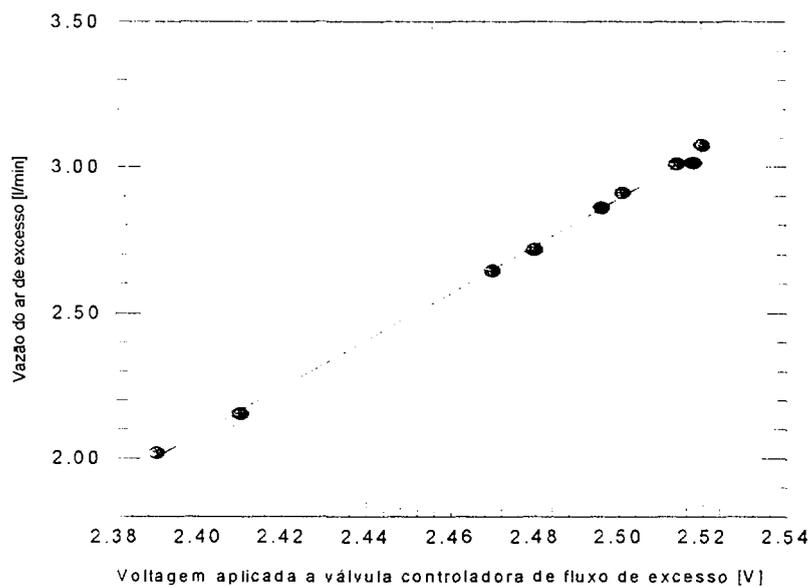


Figura 3.4 Variação da vazão em relação à tensão aplicada à válvula controladora do fluxo de excesso.

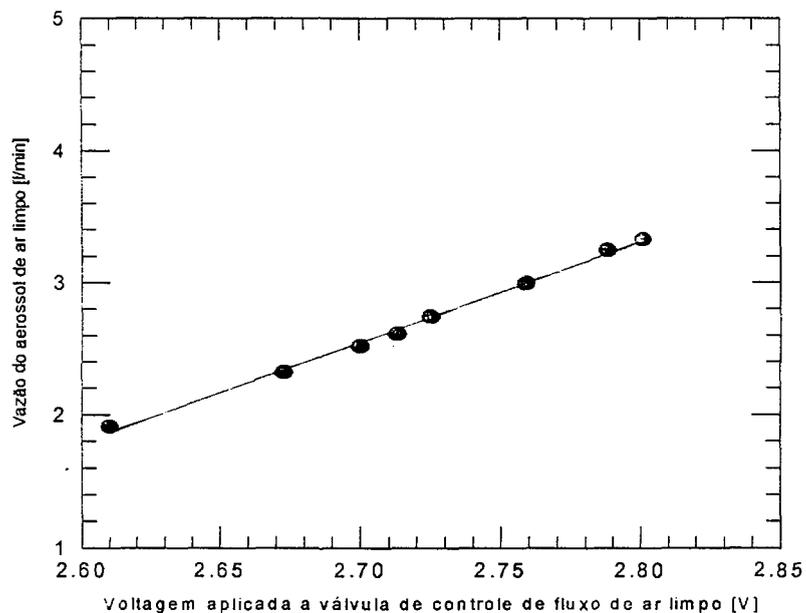


Figura 3.5 Variação da vazão em relação à tensão aplicada à válvula controladora do fluxo de ar limpo.

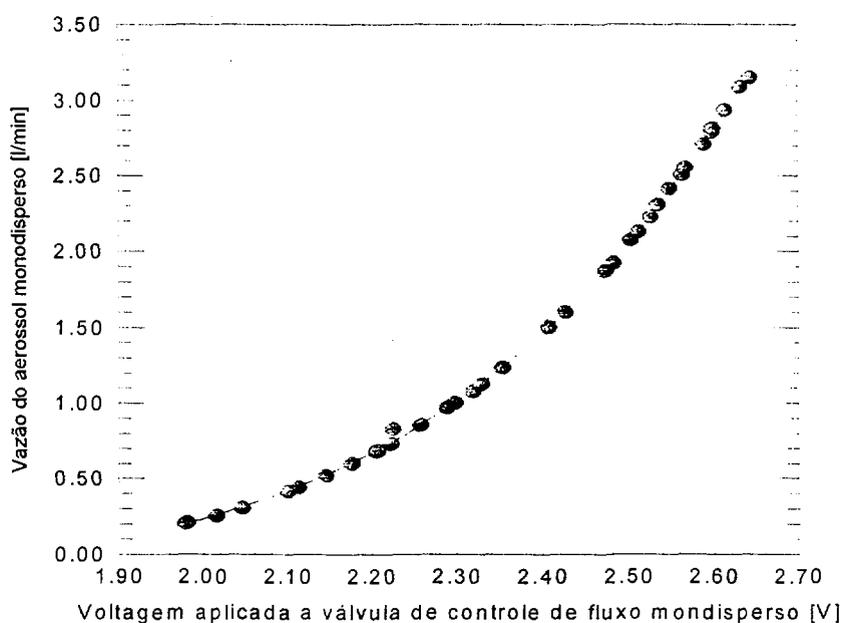


Figura 3.6 Variação da vazão em relação à tensão aplicada à válvula controladora do fluxo de aerossol monodisperso.

O segundo arranjo experimental usado gerou partículas com diâmetro na faixa de 0,8 a 2,2 μm . Neste arranjo, as partículas foram geradas com o auxílio de um atomizador de orifício vibrante. O arranjo experimental usado é apresentado na Figura 3.7.

O gerador de aerossol de orifício vibrante gera partículas de aerossóis monodispersos na faixa de 0,5 a 50 μm . Os diâmetros das partículas podem ser determinados com base nas condições de operação do gerador, de modo que o aerossol possa ser considerado como padrão primário de tamanho de partícula. A concentração da solução deve ser constante para gerar aerossóis monodispersos do tamanho determinado (Hinds, 1982; Willeke & Baron, 1993).

No gerador de orifício vibrante, a solução é introduzida em um pequeno orifício com o auxílio de uma seringa em uma taxa pré-determinada. O orifício vibra a uma frequência constante devido à tensão alternada aplicada a um cristal piezométrico que suporta do prato do orifício. Um fluxo de gotas uniformes é introduzido no centro de um jato de ar turbulento, que dispersa as gotas e evita a aglutinação. As gotas

dispersas são misturadas com um grande volume de ar limpo e seco que evapora a parte volátil da gota.

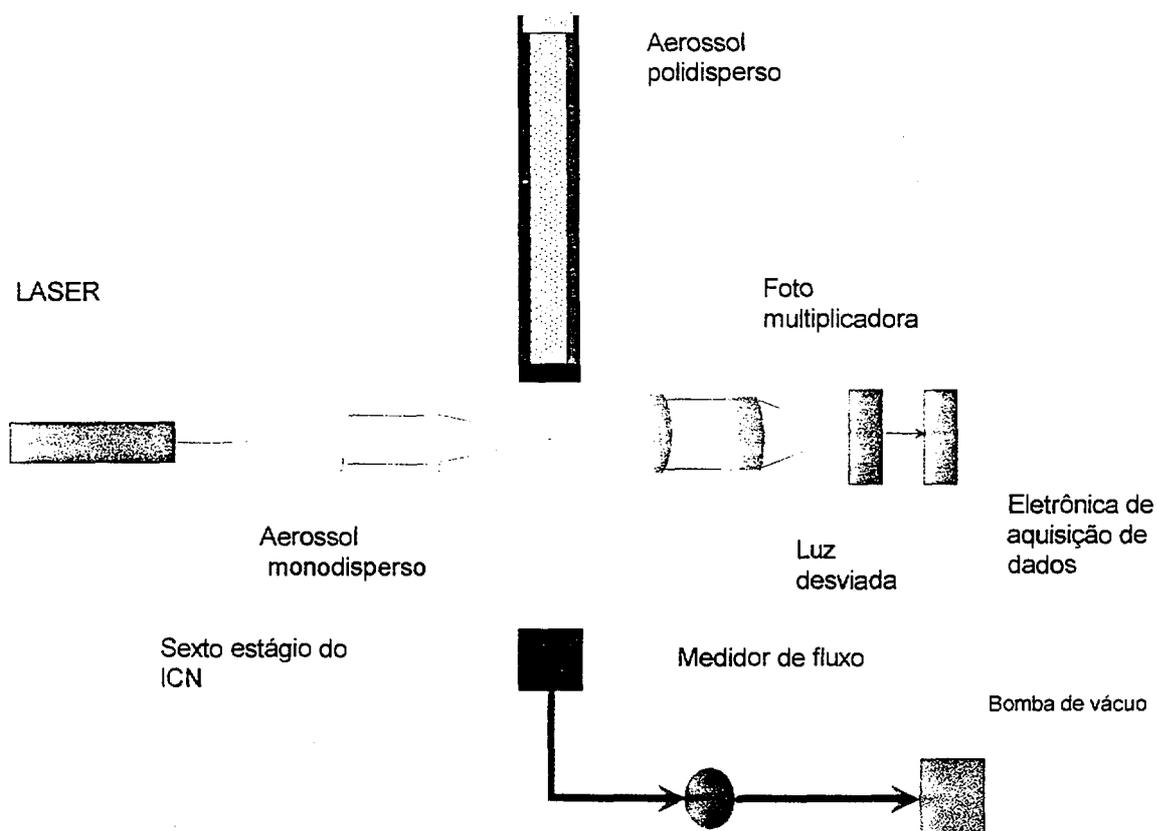


Figura 3.7 Arranjo experimental usando para gerar partículas entre 0,8 e 2,2 μm .

Como cada parâmetro de perturbação (tensão, fluxo e concentração da solução) produz um único tamanho de partícula, o tamanho preciso da gota pode ser determinado usando os parâmetros de operação.

Um sensor ótico foi usado para determinar o número de partículas de cada fluxo de aerossol gerado. Sobre o feixe monodisperso incidia um feixe de laser dividido. Os dois feixes primários eram absorvidos por um interruptor de feixe. A partícula ao passar através por estes dois feixes espalha a luz e um sistema de lentes a converge sobre um tubo fotomultiplicador. A partícula ao passar pelos dois feixes

produziu um par de pulsos elétricos.

O intervalo de tempo entre os dois pulsos gerados foi medido por relógio digital de alta velocidade com resolução de 2 nanosegundos. Cada medida de intervalo de tempo foi enviada para um multicanal acumulador (MCA) com sensor APS (Aerodynamic Particle Sizer) estoca as contagens de tempo. Após o término das medidas o sensor APS calcula o número de partículas por faixa de tamanho no aerossol gerado, em relação a uma curva de calibração interna do sistema.

Neste arranjo experimental as partículas foram geradas usando o gerador de aerossol de orifício vibrante (VOAG TSI-3050, 1985) o sensor para determinação de tamanho de partícula (APS 33B da TSI). Ao orifício vibrante aplicou-se uma frequência de 144 Hz, e o fluxo de alimentação da solução foi $5,19 \times 10^{-2} \text{ cm}^3/\text{min}$.

O tamanho das partículas geradas foi determinado pelas diferentes concentrações de ácido oleico nas soluções.

O diâmetro da gota formada, d_d , é dado por (Hinds, 1982; Willeke & Baron, 1993):

$$d_d = 10^{10} \left(\frac{6 Q}{\pi f} \right)^{1/3} \quad 3.6$$

onde:

d_d → diâmetro da gota (μm);

Q → fluxo do líquido (cm^3/s);

f → frequência de vibração da fonte (Hz);

10^4 → fator de correção de unidade.

O diâmetro da gota é cerca de dezenas de microns. Um jato de ar turbulento dispersa as gotas antes delas coagularem, sendo introduzido ar seco e filtrado para secar e transportar o aerossol proveniente do gerador. Após a evaporação do solvente, o diâmetro da partícula (d_p) é relacionado à concentração pela equação (Hinds, 1982; Willeke & Baron, 1993):

$$d_p = c^{1/3} d_d \quad 3.7$$

onde:

d_p → diâmetro da partícula (μm);

d_d → diâmetro da gota (μm);

c → concentração volumétrica do soluto na solução.

Os efeitos indesejáveis mais comuns são a formação de gotas muito menores que as gotas desejadas ou partículas formadas pela coagulação de múltiplas gotas. Estes efeitos podem ser minimizados com o ajuste da frequência da fonte (Hinds, 1982).

Partículas geradas pelo orifício vibrante carregam milhares de cargas elementares. Neste arranjo, também, foi usado um Neutralizador de ^{85}Kr da TSI, modelo 3077 (TSI-3071, 1985) para neutralizar as partículas geradas .

3.3 CURVA DE EFICIÊNCIA DO SEXTO ESTÁGIO

Os aerossóis obtidos nos dois arranjos experimentais apresentaram uma distribuição de tamanho monodisperso. Em ambos os arranjos experimentais usados para calibração, o impactador foi colocado na saída do aerossol monodisperso. A vazão do impactador foi mantida constante e igual a 12 l/min. A superfície impactadora foi o filme de Mylar sem película de graxa e como filtro final foi usado filtro de fibra de vidro (Wahntman^R GF/A). As amostras de partículas foram coletadas por 30 min.

Em ambos os arranjos experimentais, o aerossol foi gerado a partir de soluções de ácido oleico ($\text{C}_{18}\text{H}_{32}\text{O}_2$) diluído em álcool isopropílico. As partículas geradas eram marcadas com nitrato de uranila (Lui & Pui, 1974 e 1975; Hinds, 1982). Foram geradas partículas de tamanhos diferentes. A remoção das partículas coletadas sobre a superfície impactadora foi feita colocando-se a superfície impactadora em um bequer com 10 ml de água destilada e levando ao ultra-som por 3 minutos. O filtro foi retirado e adicionado 1 ml de hidróxido de sódio 0,001N. A solução era medida

com um espectrofotômetro para determinação da concentração de urânio presente em cada solução. A eficiência de retenção para cada tamanho de partícula foi determinada como a razão entre a concentração na superfície de impactação e a concentração no filtro final.

No primeiro arranjo experimental, o aerossol com partículas marcadas com uranila foi gerado a partir de diferentes diluições da solução de ácido oleico (ácido oleico diluído em álcool isopropílico), em álcool etílico PA. Os volumes de álcool foram de 100, 150 e 500 ml para 500 µl da solução de ácido oleico, sendo obtidas diferentes distribuições de tamanho de acordo com a concentração usada. Foram geradas seis faixas diferentes de tamanho (0,4, 0,45, 0,5, 0,55, 0,6 e 0,7 µm) com estas soluções. As partículas com diâmetro de 0,3 µm foram geradas usando uma solução que continha 1 000 ml de álcool etílico e nitrato de uranila em quantidade suficiente para tingir a solução. Para garantir a concentração desejada nas soluções usadas no nebulizador, estas eram trocadas a cada 2 horas de trabalho, ou quando era verificada alguma modificação na distribuição de tamanho das partículas do aerossol gerado. A distribuição de tamanho das partículas em cada nova solução era determinada antes do início de seu uso na calibração. Para verificar se a distribuição de tamanho das partículas dos aerossóis gerados não havia variado ao longo do tempo durante a geração do aerossol, periodicamente era verificada a distribuição de tamanho de partícula. Na Tabela 3.4 são apresentadas as distribuições de tamanho de partículas geradas com as diferentes concentrações de álcool.

Tabela 3.4 Variação da distribuição de tamanho das partículas em cada uma das concentrações usadas para gerar as partículas no primeiro arranjo experimental.

Diâmetro da partícula (µm)	Voltagem (V)	Concentração de partículas (partículas /cm ³)			
		S1	S2	S3	S4
0,3	2 920	1,2x10 ⁴	3,2x10 ⁴	2,5x10 ⁴	5,0x10 ³
0,4	3 823	5,7x10 ³	1,3x10 ⁴	1,0x10 ⁴	3,1x10 ³
0,45	4 450	4,7x10 ³	9,2x10 ³	0,8x10 ⁴	6,0x10 ²
0,5	5 091	3,9x10 ³	7,4x10 ³	0,6x10 ⁴	2,8x10 ²
0,6	6 379	3,3x10 ³	5,6x10 ³	4,5x10 ³	8,5x10 ¹
0,7	7 684	2,7x10 ³	2,7x10 ²	9,0x10 ¹	0,3x10 ¹
0,8	9 000	1,1x10 ²	1,9x10 ¹	1,0x10 ¹	0,1x10 ¹

S1=100 ml de álcool e 500 µl de solução de ácido oleico a 10%.

S2=150 ml de álcool e 500 µl de solução de ácido oleico a 10%.

S3=500 ml de álcool e 500 µl de solução de ácido oleico a 10%.

S4=álcool enitrato de uranila suficiente para tingir a solução.

No segundo arranjo, foi usada uma determinada concentração de ácido oleico diferentes para gerar cada um dos aerossóis com tamanhos diferentes de partículas. Na Tabela 3.5 são apresentados os valores das concentrações para cada diâmetro de partícula.

Tabela 3.5 Tamanho das partículas para as diferentes concentrações usadas para gerar as partículas no segundo arranjo experimental.

Diâmetro das partículas (µm)	Concentrações (partículas/cm ³)
0,8	63,48x10 ⁻⁶
1,0	87,09x10 ⁻⁶
2,2	927,2x10 ⁻⁶

Antes de reiniciar uma nova coleta, o impactador em cascata era lavado com álcool etílico PA. O número mínimo de repetições para cada tamanho de partícula gerado foi cinco. Na Figura 3.8 é apresentada a curva de eficiência experimental obtida para este estágio. No eixo do horizontal, em escala logarítmica, foram marcados os diâmetros das partículas geradas. No eixo vertical, em escala probabilística, estão os valores das frequência acumuladas correspondente a cada

tamanho de partícula gerada.

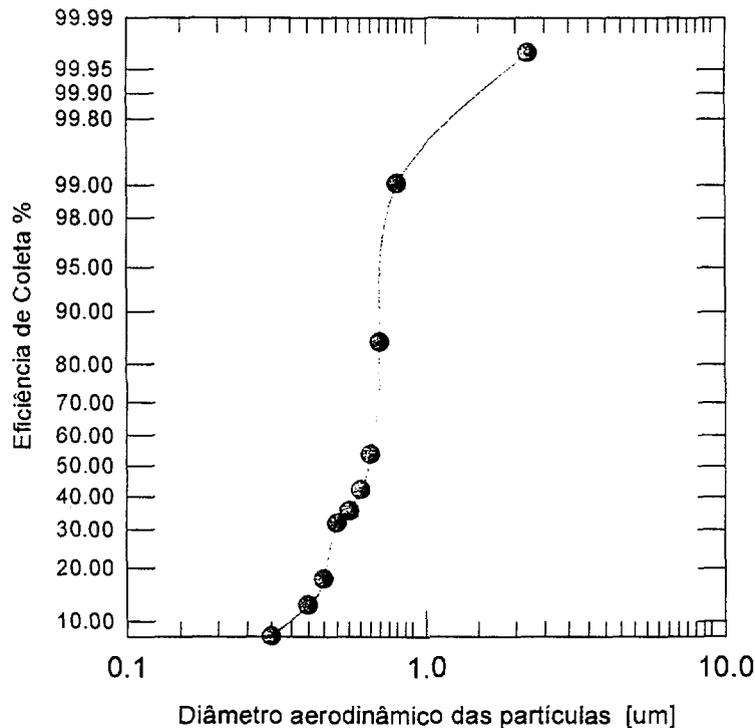


Figura 3.8 Curva de eficiência experimental determinada para o sexto estágio do ICN.

Como já foi dito acima, a curva de eficiência ideal de um impactador seria descrita por uma função degrau, ou seja, todas as partículas maiores que o diâmetro de corte seriam coletadas e as partículas menores não o seriam. No entanto, o que se observa, na prática, é que um pequeno número de partículas maiores e menores que o corte são coletadas. Este desvio da curva de eficiência ideal é devido a partículas maiores e menores que o diâmetro de corte que entram no cone de impactação, sendo impactadas.

Como o número de partículas maiores e menores que o diâmetro de corte são iguais, as curvas de eficiência ideal e real se cortam no ponto que corresponde a 50% da distribuição de frequência acumulada. Assim sendo, o diâmetro de corte

determinado pelas duas curvas é o mesmo. O diâmetro mediano experimental determinado foi 0,643 μm . Este valor está de acordo com o valor teórico previsto (0,6435 μm). Como o resultado experimental comprovou o valor calculado teoricamente, foi adotada a calibração teórica para os demais estágios do impactador.

3.4 INTERCOMPARAÇÃO COM UM IMPACTADOR EM CASCATA FABRICADO COMERCIALMENTE

O impactador em cascata desenvolvido em nosso laboratório (ICN) foi intercomparado com um impactador fabricado comercialmente (DIC-6). Os diâmetros de corte dos dois impactadores em cascata são apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 Diâmetro de corte dos estágios do impactador em cascata nacional (ICN) e do impactador comercial (DIC-6), para vazão de calibração de 12 l/min.

Número do Estágio	D_{50} (μm)	
	ICN	DIC-6
	1	2
1	19,4	16
2	9,9	8
3	4,7	4
4	2,4	2
5	1,0	1
6	0,64	0,5

No impactador DIC-6 a superfície impactadora é uma placa de vidro, a qual foi substituída por um filme de Mylar, para que as amostras coletadas pudessem ser analisadas pelo método PIXE (Dias da Cunha, 1988).

As amostras para intercomparação foram coletadas nas Usina de Beneficiamento de Areias Monazíticas da INB, nas etapas de beneficiamento físico e químico da areia monazítica. As amostras foram coletadas nos dois impactadores simultaneamente distando um do outro cerca de 50 cm, para evitar interferência de um amostrador no outro. As posições dos impactadores foram alternadas a cada amostragem. Deste modo, foi garantida a não interferência, nos resultados, do ponto de coleta das amostras.

As massas elementares coletadas em ambos os impactadores foram

determinadas pelo método PIXE. Os valores do Diâmetro Aerodinâmico Mediano de Massa (MMAD) foram determinados com ajuste dos pontos pelo método dos mínimos quadrados. Em ambos os impactadores, foi desprezada a contribuição do primeiro estágio. Foram determinados 38 valores de MMADs, com cada um dos impactadores.

Os valores de MMAD das partículas contendo Th e U, coletados com o DIC-6, foram publicados em 1994 (Dias da Cunha et al., 1994).

Os valores de MMAD determinados com cada um dos impactadores são apresentados na Figura 3.9.

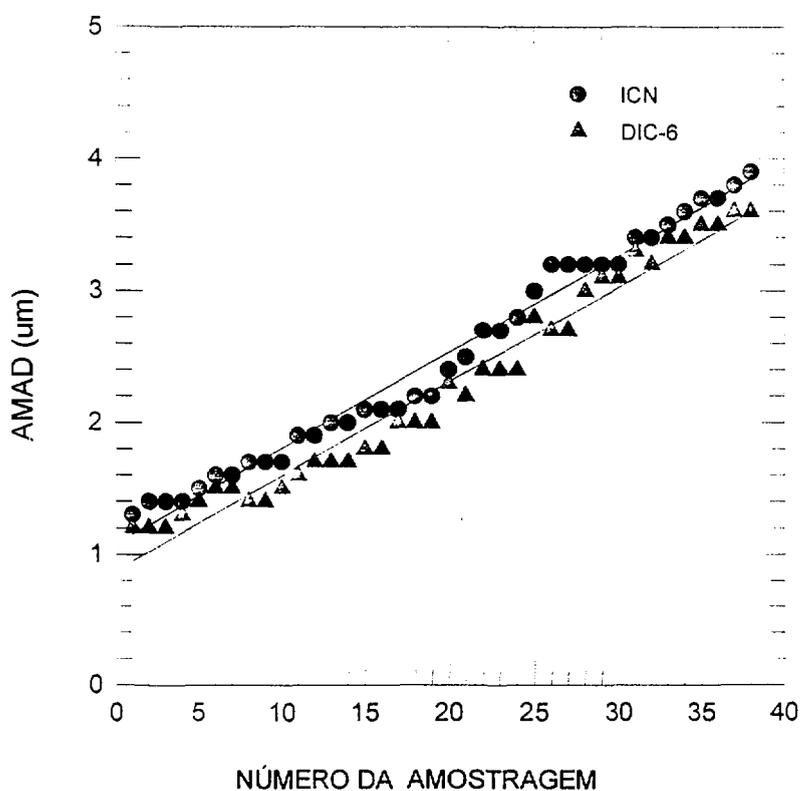


Figura 3.9 Valores de MMAD determinados usando o ICN e o impactador comercial (DIC-6).

Os dados foram alinhados de acordo com a ordem crescente dos valores de MMAD obtidos com o ICN. Tais dados foram analisados com o auxílio do programa

Sigma Plot (Jandel & Co). Os valores de MMAD do ICN variaram de 1,3 a 3,4 μm . Os do DCI-6 variaram de 1,2 a 3,6 μm . Foi ajustada uma reta para os valores de MMAD do ICN e outra para os valores de MMAD do DCI-6. O coeficiente angular calculado para ambas as retas foi 0,07, indicando que as retas são paralelas. Os coeficientes lineares calculados foram 1,08 e 0,88 para as retas obtidas com os dados do ICN e DCI-6, respectivamente. Os de (σ_g) variaram de 1,7 a 2,7. Os valores de σ_g maiores que 1,2 indicam que o aerossol apresentava uma distribuição de tamanho polimodal. No entanto, o intervalo entre as faixas amostradas não permitiu separá-las.

A faixa de tamanho de partículas amostradas pelo ICN é de 0,64 a 19,9 μm , enquanto que a faixa amostrada pelo DIC-6 é de 0,5 a 16 μm . A variação nos diâmetros de corte dos dois impactadores fez com que fossem coletadas amostras de partículas em faixa de tamanho diferentes. Estes resultados estão de acordo com os valores calculados de σ_g que indica uma distribuição polimodal para o aerossol.

O segundo estágio do ICN seleciona as partículas com diâmetro aerodinâmico igual a 10 μm e o quarto estágio partículas com diâmetros de 2,5 μm . Os diâmetros de corte para estes mesmos estágios no DCI-6 são 8 e 2 μm , respectivamente. Os valores dos diâmetros de corte do segundo e quarto estágios do ICN separam as frações inalável e respirável do aerossol. Como o aerossol é polidisperso e os amostradores não possuem resolução para separar as diferentes modas de tamanho existentes, e os amostradores coletam partículas em faixas de tamanho diferentes, é aceitável que os valores de MMAD variassem. A variação máxima observada entre os valores foi 10%. Deste modo, podemos concluir que os valores encontrados com o impactador desenvolvido em nosso laboratório estão de acordo com os valores obtidos com o impactador fabricado comercialmente.

As principais vantagens do ICN em relação ao impactador ao qual foi comparado (DIC-6) é o diâmetro de corte do segundo e quarto estágios que separam as partículas nas frações inalável e respirável, e as amostras poderem ser analisadas por PIXE sem modificar a superfície impactadora.

O ICN simula as frações de aerossóis que se depositam na região do trato respiratório superior (fração inalada) e na região pulmonar (partículas respiráveis).

DESCRIÇÃO DAS INSTALAÇÕES ESTUDADAS

Para avaliar a exposição de trabalhadores à poeira de minério, foram selecionadas duas mineradoras que processam minério contendo tório associado à rede cristalina e uma indústria que utiliza o nitrato de tório como matéria-prima. Tais instalações, que aceitaram colaborar com o nosso projeto, serão doravante identificadas como Instalações **A**, **B** e **C**, respectivamente.

4.1 DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO A

A Instalação **A** está localizada na região norte do Estado do Amazonas. O acesso à mineradora é feito por via aérea, com pista de pouso operacional para aviões de pequeno e médio porte ou por via terrestre, pela BR 174.

A região é, predominantemente, coberta por rochas do subgrupo Uatamã, compostas de extrusões vulcânicas e intrusões graníticas. Estas rochas são sobrepostas por sedimentos inativos de cobertura, nos quais ocorrem corpos graníticos da suíte intrusiva Abonari. A análise do solo por fluorescência de raios X estimou teores de 0,002% de U_3O_8 e 0,023% de ThO_2 (Castanho, comunicação pessoal).

Na área situada entre os vales dos rios Alalaú (a oeste) e Pitinga (a leste) todos os igarapés contêm depósitos aluvionares mineralizados em cassiterita (Castanho, comunicação pessoal).

O solo é ácido, com pequena espessura fértil, e as rochas intrusivas do tipo alcalina são do Proterozóico Médio, com idade de aproximadamente 1,7 bilhões de anos (Castanho, comunicação pessoal).

A Instalação **A** explora uma jazida com potencial nos seguintes minerais: SnO_2 , Nb_2O_5/Ta_2O_5 , $ZrSiO_4$, Y_2O_3 e terras raras (Castanho, comunicação pessoal).

Atualmente, produz-se em escala industrial apenas SnO_2 , e em escala experimental Nb_2O_5/Ta_2O_5 . São utilizados apenas processos físicos para concentração

dos minérios, tais como processos gravimétricos, separação eletrostática e magnética (Castanho, comunicação pessoal).

Os métodos de lavra adotados nesta mineradora são: lavra aluvionar e lavra do minério primário.

Os depósitos aluvionares são de pequenas dimensões, variando entre 50 e 300 m de largura, com profundidade média de 4 m. Os sedimentos são extremamente jovens e mal classificados, o que indica rápida e recente deposição durante movimentação de grandes massas (Castanho, comunicação pessoal).

A metodologia de implantação de uma lavra aluvial obedece a uma seqüência de etapas bastante trabalhosas e complexas. A preparação de novas áreas para lavra é uma atividade contínua. Enquanto a lavra se desenvolve em um trecho do igarapé, o trecho seguinte vai sendo preparado.

O método de lavra aluvionar é selecionado com base nas características físicas e geológicas dos depósitos, cujos parâmetros principais são: teor médio, espessura média, volume do depósito, largura e gradiente do igarapé, vazão e presença ou ausência de matacões.

Na Instalação A são utilizados 3 métodos de lavra aluvial, com pequenas variações: planta flutuante (PF) alimentada por draga, planta flutuante alimentada por retro-escavadeira (PF) e planta flutuante móvel (PM) (Castanho, comunicação pessoal).

A planta flutuante (PF) alimentada por dragas é o método mais produtivo. As plantas são as maiores em tamanho, requerendo grandes painéis inundados e grande volume de água para o processo. As plantas foram especialmente projetadas e montadas para as dragas. Uma bomba de sucção transporta para a planta a polpa contendo minério, com 17% de sólidos em peso, através de uma tubulação montada em flutuadores. A água de processo é bombeada da bacia, e os rejeitos são depositados a 50 m da planta na mesma bacia (Castanho, comunicação pessoal).

A planta flutuante alimentada por retro-escavadeiras opera da mesma maneira que a anterior, exceto quanto à forma de alimentação da planta com a polpa, a qual é feita por retro-escavadeiras flutuantes. Estas são menores que as anteriores. As retro-escavadeiras permitem maior flexibilidade na operação de dragagem; as superfícies de inundação e o consumo de água são menores.

As plantas móveis (PM) são alimentadas por bombas de sucção. O método é clássico: um jato d'água desmonta o minério e conduz a polpa a uma bomba de sucção. Quando possível, são usados tratores para escavar o minério e transportá-lo para a proximidade d'água. Este método é indicado para pequenas reservas com alto teor, devido ao alto custo operacional (Castanho, comunicação pessoal).

4.1.1 OPERAÇÃO DA LAVRA ALUVIONAR

Para se dar início à lavra, os trechos escolhidos dos igarapés são preparados, os sedimentos de fundo são escavados ou desmontados e conduzidos para as pré-concentradoras.

O minério bruto passa por uma peneira para retirada de pedras e vegetais, que são devolvidos para a bacia de rejeito. O minério passa por um deslamador, o transbordo é jogado na bacia de rejeito e o minério segue para o ciclone (ou desaguador). Em seguida, passa por 3 jigagens e caixas desaguadoras consecutivas. O rejeito de cada fase é jogado na bacia de rejeito. O produto final da Planta Flutuante é um pré-concentrado final, que é enviado por caminhões para a Usina de Beneficiamento de Minério (UBM). Como os teores de estanho são baixos (<0,01%), a recuperação da massa é menor que 5%, sendo 95% da massa escavada descartada como rejeito no próprio leito do igarapé lavrado (Castanho, comunicação pessoal).

Todas as atividades de pré-concentração são úmidas e confinadas.

4.1.2 LAVRA DO MINÉRIO PRIMÁRIO E PRÉ-CONCENTRAÇÃO

A extração do minério do Morro primário é feita por lavra convencional a céu aberto. Atualmente, a lavra desenvolve-se na zona intemperizada, pelo método convencional de desmonte por retro-escavadeira, carga e transporte por caminhões.

O material desmontado é transportado por caminhões para unidades pré-concentradoras localizadas próximas aos limites da zona mineralizada, que recupera apenas minério acima de 270 malhas. O fluxo de caminhões é controlado em um ponto da estrada entre a cava e a unidade pré-concentradora, que anota o número de viagens de cada caminhão. O material descartado nas pré-concentradoras, contendo ainda teores recuperáveis de estanho, é lançado em bacias de deposição

construídas no leito dos igarapés especialmente para este fim. Todo material depositado nas bacias de deposição contém, ainda, altos teores aproveitáveis de estanho, estando previsto o seu retrabalhamento nas unidades de pré-concentração em futuro próximo (Castanho, comunicação pessoal).

4.1.3 BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO

Todo o pré-concentrado produzido nas Plantas Flutuantes (PF's), Plantas Móveis (PM's) de pré-concentração (minério aluvionar) e nas Plantas de Lavagem (PL's), que são unidades fixas de pré-concentração do minério primário, é constituído basicamente de cassiterita, columbita-tantalita, zirconita, quartzo, xenotima e óxidos de ferro (Castanho, comunicação pessoal).

O pré-concentrado é transportado para uma usina de beneficiamento UBM-1, localizada em um platô próximo ao igarapé Jacutinga, produzindo-se aí o concentrado final de cassiterita. O concentrado é bombeado para mesas de jigagem para concentração do SnO_2 . O rejeito das mesas passa por uma peneira e em seguida por duas mesas de separação. Na primeira delas é retirada a sílica. O produto da separação é seco em forno giratório. O minério seco é separado por separadores eletrostáticos; a fração condutora do minério é formada por zirconita e mistos, e a fração não-condutora por niobato-tantalato e cassiterita. A fração condutora segue para separadores magnéticos para obtenção dos mistos (magnéticos) e do concentrado de zirconita (não-magnética), que é estocada em uma barragem de rejeito. A fração não-condutora segue para os separadores magnéticos, para obtenção do concentrado de niobato-tantalato (fração magnética) e do concentrado de cassiterita (não-magnética). O concentrado de nióbio-tantalato é estocado em barragem e o concentrado de cassiterita é embalado em sacolões e transportado para São Paulo (Castanho, comunicação pessoal).

Os mistos são bombeados para outra unidade de beneficiamento, situada a pequena distância da primeira, denominada UBM-3, onde são recuperados o estanho, o zircônio e niobato-tantalato. O processo de concentração do minério é semelhante ao processo usado na UBM-1. O concentrado é embalado em sacolões de poliestireno com capacidade de 1 t cada um (Castanho, comunicação pessoal).

Na Figura 4.1 é apresentado o fluxograma esquemático das principais etapas

do beneficiamento de minério.

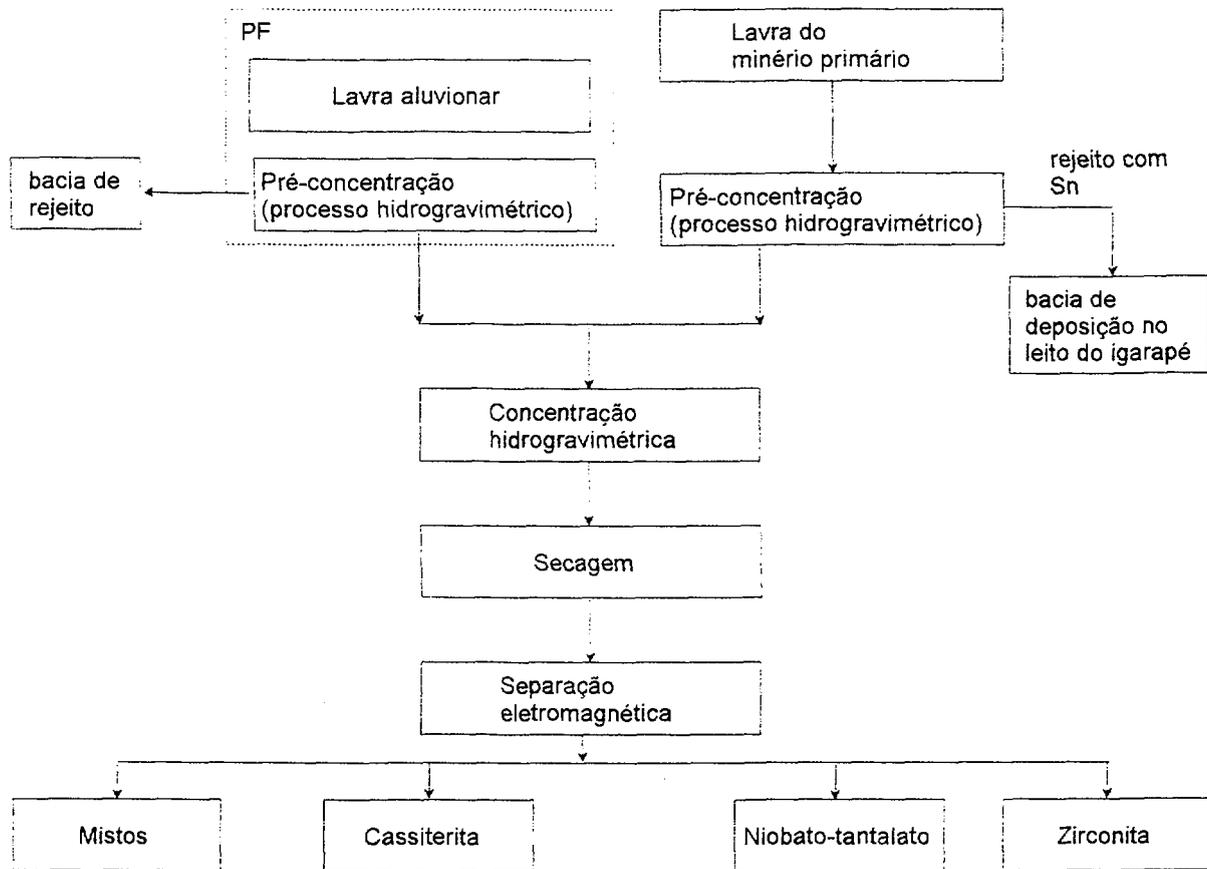


Figura 4.1 Fluxograma esquemático das principais etapas de extração e beneficiamento do minério, na Instalação A.

O laboratório de controle de qualidade e o setor de administração da mina estão localizados fora das áreas de lavra e das usinas de beneficiamento.

Além das instalações industriais, na área da mineração existe uma vila residencial, onde vivem cerca de 3.500 habitantes, entre trabalhadores e seus familiares. Na vila existe uma escola, um hospital, um pequeno mercado de apoio, uma casa de hóspedes e um laboratório de controle ambiental e de radioproteção. A vila dista cerca de 14 km das unidades de beneficiamento e das frentes de lavra (Castanho, comunicação pessoal).

4.2 DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO B

A Instalação B está localizada no carbonatito de Catalão, a sudoeste do Estado de Goiás. Um processo de decomposição dissolveu e removeu os carbonatos, deixando sobre o carbonatito fresco uma camada residual, a qual contém grande variedade de minerais primários e secundários. Os minerais primários são o pirocloro, apatita, magnetita, titano magnetita, ilmenita, monazita, perovskita, barita e espheno (Relatório da Instalação B).

O minério processado durante o período da segunda visita foi analisado por fluorescência de raios X para identificação dos principais elementos presentes em diferentes granulometrias. Os resultados, apresentados na Tabela 4.1, indicam que a composição do minério variou de acordo com a granulometria. Os elementos presentes foram classificados em quatro grupos: principais, secundários, menores e traços, de acordo com o número de raios X característicos emitidos por cada elemento em relação ao número total de raios X emitidos pela amostra. Na amostra de minério bruto, os elementos em maior abundância são o Fe e o Nb, enquanto que nas amostras de minério com granulometria entre 270 e 400 mesh, os mais abundantes são o Nb, Fe e Sr. Nas amostras abaixo de 400 mesh, o Fe e o Nb são os mais abundantes. O Th e o U aparecem como traços apenas nas amostras de minério com granulometria menor que 270 mesh e maior que 400 mesh (IEN, 1996).

Tabela 4.1 Análise quantitativa da composição elementar do minério por fluorescência de raios X

Granulometria	Elementos por abundância			
	Principal	Secundários	Menores	Traços
Bruto	Fe, Nb	Ba, Ti, Sr	Mn, Ce, Nd, La	Y, Pb, Zn, Cu
< 200 mesh	Fe, Nb, Sr	Ba, Ti, Mn, Ce, Zr, La, Nd	Pb, Y	Zn, Cu, Pr, Th, U, Ni
< 400 mesh	Fe, Nb	Ba, Ti, Sr, Mn	Ce, Nd, La, Zr, Sm, Pb	Zn, Cu, Pr, Th, U

O minério é extraído em mina a céu aberto. Tendo em vista a característica terrosa do minério, as operações de lavra são simples, constituindo-se em escavação, empurre, carregamento e transporte. O minério é extraído de mais de uma frente de lavra, as quais possuem teores médios diferentes. Estas etapas do processo são

mecanizadas e realizadas por 4 trabalhadores, a cada turno de 8 h, iniciando-se o primeiro às 6 h da manhã.

O fluxograma simplificado de cada etapa do processo é apresentado na Figura 4.2.

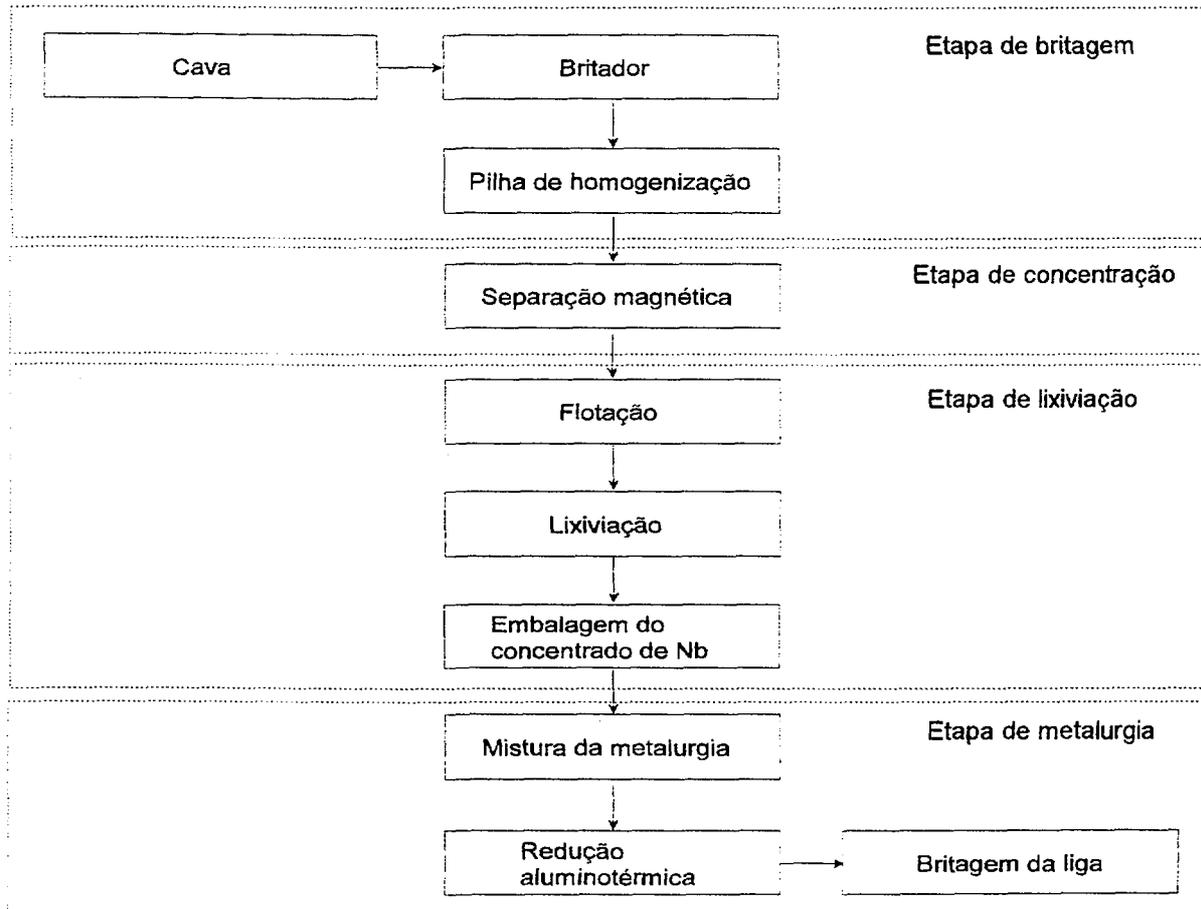


Figura 4.2 Esquema simplificado das principais etapas da extração e beneficiamento do minério, na Instalação B.

O minério é transportado por caminhões para pilhas de pré-homogeneização, sendo transferido por intermédio de alimentador de sapatas para a grade vibratória. O retido (*oversize*) alimenta o britador do tipo mandíbula. A fração fina do minério (*undersize*) e do britado são transferidos para a peneira vibratória com malha 3/4", sendo o retido rebitado em britadores de impacto. Até esta fase, as operações são realizadas a céu aberto. As peneiras são confinadas e a fração peneirada (*undersize*)

é homogeneizada em pilhas lineares. O minério homogeneizado é transferido por correias, em túnel e a céu aberto, para o silo da unidade de concentração (Relatório da Instalação B).

O minério sofre nova britagem em moinho de barras, sendo em seguida classificado em ciclones. A fração grossa vai para moinhos de bolas em circuito fechado que, após a britagem, se combina com as frações finas dos ciclones, seguindo para separadores magnéticos. A fração magnética é descartada como rejeito. Nesta fase do processo termina a etapa de concentração (Relatório da Instalação B).

A fração não-magnética sofre deslamagem em ciclones, sendo rejeitada como lama a fração menor que 3 μm . O produto obtido da deslamagem é classificado como "grosso" e "fino". Ambos sofrem flotação em separado. A fração grossa vai para o circuito de *rougher* e quatro estágios *cleaner* (em contra corrente) e os finos vão para outro circuito de *rougher* e dois estágios *cleaner*, também em contra corrente. Nesta fase termina a etapa de concentração. Os rejeitos provenientes da separação magnética, da deslamagem e da flotação são lançados na barreira de rejeito. Na etapa de concentração estão envolvidos 13 trabalhadores, em dois turnos de 8 h. As fases que envolvem maior consumo de energia também param durante o período de pico de maior custo da energia elétrica (Relatório da Instalação B).

O produto das flotações é filtrado e estocado em silos e, em seguida, lixiviado. O concentrado de pirocloro é transportado por dutos para o setor de lixiviação. O concentrado obtido da lixiviação alimenta reatores de ácido clorídrico por injeção de vapor. A descarga dos reatores sofre lavagem por desaguamento e repolpagem. O concentrado segue por dutos para reatores de soda cáustica. O produto dos reatores é transferido para fornos rotativos. A descarga dos fornos recebe água e é bombeada para o ciclone, cujo *underflow* alimenta o filtro de tambor, sendo a torta ensilada e o *overflow* encaminhado a espessadores. Os finos sedimentados são filtrados em filtros prensa e a torta ensilada. Os grossos e finos são misturados durante a alimentação do forno calcinador, sendo após a descarga resfriados e embalados. Na embaagem do concentrado de Nb, o produto da lixiviação é estocado em silo e transferido para tambores de 60 kg. Esta fase é automática, sendo executada na entrada do galpão. Nesta fase do processo termina a etapa de lixiviação. Nela estão envolvidos 7

trabalhadores em dois turnos de 8 h cada um (Relatório da Instalação B).

As etapas de concentração e lixiviação são executadas em um mesmo galpão aberto.

O produto da lixiviação segue para a etapa de metalurgia, para obtenção da liga Fe-Nb. Nesta etapa, inicialmente, o produto da lixiviação é misturado a pó de alumínio, óxido de ferro e fluorita, entre outros. Os diferentes elementos do processo são misturados e homogeneizados em um homogeneizador fechado. Este homogeneizador é transportado por uma ponte rolante até a área de reação, que consiste de um banco de areia, no qual são feitas cavidades suportadas por anel metálico. Ao final da reação, ficará depositado neste último o produto fundido. Devido à grande redução de volume que ocorre, o excesso de volume de reagentes fica retido em um cadinho revestido de material refratário, colocado sobre o anel metálico. A reação permite separar a escória da liga (Relatório da Instalação B).

Os gases produzidos durante o processo de produção da liga Fe-Nb, pelo processo de redução aluminotérmica, são exauridos e lavados antes de serem lançados na atmosfera.

Após a solidificação, a liga e a escória são retiradas do banco de areia e deixadas esfriar naturalmente. O grosso da escória é separado da liga, que em seguida sofre limpeza dos resíduos de escória. A liga é britada conforme solicitação da granulometria desejada pelo cliente, sendo então embalada (Relatório da Instalação B).

Este processo ocorre em um galpão independente das etapas anteriores e envolve 9 trabalhadores. A britagem da liga, o processo de aluminotermia e a embalagem da liga são realizados no mesmo galpão, porém em turnos diferentes. A britagem e embalagem da liga são realizadas durante os turnos diurnos, enquanto que o processo de aluminotermia ocorre das 24 às 6 h. O trabalhador que controla a britagem da liga e coleta de amostras para o controle de qualidade do produto usa máscara, assim como alguns trabalhadores da mistura. No entanto, o uso de máscara não é obrigatório na empresa, sendo apenas uma recomendação da CIPA (Comissão Interna de Prevenção de Acidente).

A escória, por ocasião das duas visitas à instalação, era separada da liga e britada. Durante o processo de britagem, a escória era misturada com água para

redução da poeira. A britagem da escória ocorria em um galpão separado usado somente para este fim. Os trabalhadores envolvidos na britagem da escória são os mesmos que controlam a britagem da liga. Segundo informações da mineradora, este processo foi retirado da linha de produção, sendo a escória fracionada já durante a formação da liga no processo aluminotérmico.

Os trabalhadores fazem rodízio nos 3 turnos. Deste modo, não estão fixos a uma determinada atividade, mas sim, executam as atividades de acordo com o turno de trabalho. Portanto, os trabalhos não são constantes, dependendo das necessidades do processo.

4.3 DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO C

A Instalação C está localizada na cidade do Rio de Janeiro, RJ, em um bairro industrial.

Atualmente, esta indústria produz camisas incandescentes destinadas à reposição em lanternas a gás. O processo de fabricação destas camisas é semi-manual envolvendo diversas etapas. Na Figura 4.3 é apresentado o fluxograma do processo de produção das camisas para lâmpões (Costa Ribeiro, 1972).

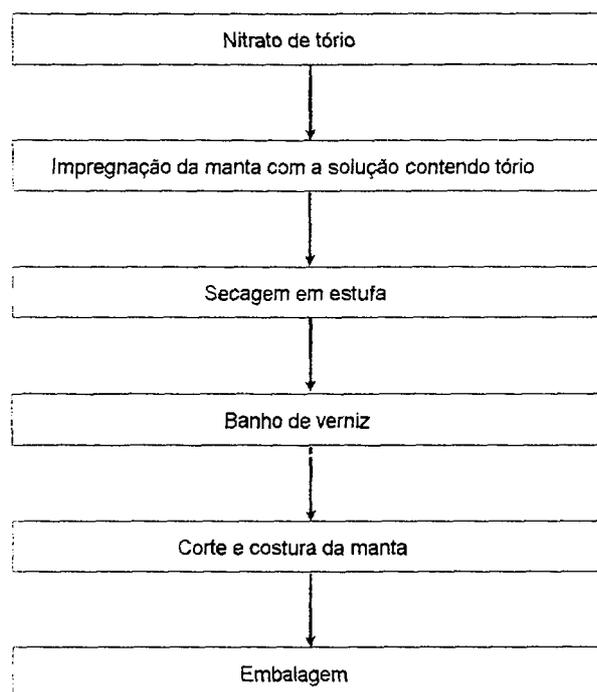


Figura 4.3 Esquema simplificado das principais etapas do processo de confecção de camisas para lâmpões.

A incandescência das camisas é gerada por uma mistura contendo nitrato de tório (Costa Ribeiro, 1972).

Todas as etapas do processo de confecção da camisa para lampião, desde a confecção da malha até a expedição, são realizadas no interior do mesmo galpão. Cada etapa do processo é agrupada sem barreiras físicas entre elas, exceto a etapa de impregnação da malhas que possui uma grade separando-a das demais etapas. Na área de impregnação a solução líquida de nitrato de tório é manipulada para preparo do banho de impregnação. Após esta etapa, as mantas impregnadas seguem para a etapa de costura.

O processo de fabricação inicia-se com um banho da malha em uma solução fraca de ácido clorídrico e amônia. Em seguida, as malhas são centrifugadas para retirada do excesso de solução e secas em estufas. As malhas são, então, enroladas por processo semi-manual. O banho de impregnação é feito usando uma solução contendo nitrato de tório, nitrato de cério, alumínio e cobalto. Por cada litro de solução são usados 637 g de nitrato de tório tetrahidratado, sendo necessários 6,7 ml desta solução para impregnar 1m de malha. Após a impregnação, as malhas são centrifugadas e desembaraçadas por processo semi-manual, seguindo então para secagem em estufa (Costa Ribeiro, 1972).

Após a secagem, as mantas são tratadas com solução de NH_4OH , sendo novamente centrifugadas, desembaraçadas por processo semi-manual e colocadas em estufas para secagem. A seguir, as mantas recebem banho de verniz, que tem como objetivo fixar o material impregnado. Após a secagem do verniz, as mantas seguem para o setor de corte e costura (Costa Ribeiro, 1972).

A etapa de corte e costura é considerada pela empresa como área livre de contaminação. A manta é cortada em diversos pedaços de 150 mm cada, que em seguida são costurados em uma das pontas. A ponta sem costura recebe uma camada de tinta para reforço e acabamento. Após secagem em estufa, a camisa recebe o acabamento final (Costa Ribeiro, 1972).

CAPÍTULO 5

MATERIAIS E MÉTODOS

Para avaliar a exposição de trabalhadores a partículas contendo tório foi necessário caracterizar o aerossol nas frações respirável e inalável. As amostras de aerossol foram coletadas nas duas mineradoras (Instalações **A** e **B**) que beneficiam minério com tório associado à rede cristalina, e na fábrica de camisa para lampiões (Instalação **C**). Além da caracterização dos aerossóis, foi necessário avaliar a incorporação de Th por cada trabalhador. Para tal, foram solicitadas amostras de fezes e urina aos trabalhadores envolvidos nas principais etapas críticas do processo, durante as quais estavam sendo coletadas amostras de ar.

As amostras de aerossóis foram coletadas usando-se amostradores seletivos, que coletam partículas nas frações respirável e inalável. As amostras foram analisadas por técnicas analíticas com baixos limites de detecção (PIXE ou espectrometria alfa), para identificar e quantificar os elementos de interesse nas amostras.

O tamanho das partículas foi determinado usando o impactador em cascata (ICN). A concentração elementar depositada em cada estágio do impactador em cascata foi determinada pelo método PIXE (*Particle Induced X ray Emission*).

A concentração isotópica foi determinada nas frações coletadas usando amostradores AGF (Amostrador Grosso e Fino) (Parker et al., 1977), que coletam amostras nas frações respirável e inalável dos aerossóis; e amostradores individuais de lapela, com corte na fração respirável, fabricados pela SKC^R (modelo 224-43XR). As concentrações de ^{232}Th , ^{228}Th e ^{230}Th , nas amostras de aerossóis coletadas com os amostradores AGF, e com amostradores individuais de lapela, foram determinadas por espectrometria alfa.

5.1 AMOSTRAS DE AEROSSÓIS

As amostras de partículas transportadas pelo ar foram coletadas nas

instalações **A**, **B**, usando o ICN, AGF e amostradores individuais de lapela e na Instalação **C**, usando o ICN e os amostradores individuais de lapela. As três instalações já foram descritas no Capítulo 4.

A coleta de amostras de aerossóis, cuja finalidade era a caracterização das partículas, aos quais estavam expostos os trabalhadores, ocorreu nos locais das principais etapas do processo de beneficiamento e nos locais onde era esperada a maior concentração de poeira de minério. Sempre que possível, os amostradores de ar foram colocados ao lado dos trabalhadores, de modo que a entrada de ar do amostrador ficasse na altura média do nariz dos trabalhadores. Os amostradores de ar foram posicionados de modo que a entrada do fluxo de ar no amostrador ficasse a 1,5 m do chão.

Os pontos de coleta de amostras foram selecionados considerando a análise do fluxograma de processo das instalações e informações da equipe técnica da mineradora sobre os pontos onde eram esperadas as maiores concentrações de poeira. Também foi considerada a rotina dos trabalhadores, sendo escolhidos os locais nos quais permaneciam por maior tempo, durante o processo, e os pontos onde houvesse energia elétrica para alimentação dos amostradores de ar.

5.1.1 IMPACTADOR EM CASCATA - ICN

As amostras de poeira de minério, para determinação da distribuição de tamanho, foram coletadas usando o impactador em cascata desenvolvido em nosso laboratório. No Capítulo 3, foi apresentado, em detalhe, o projeto e calibração do impactador nacional.

O tempo de amostragem variou para cada coleta, de modo a garantir que não haveria saturação dos estágios do impactador. O volume de ar amostrado foi determinado por um integrador de volume colocado entre o impactador e a bomba de vácuo. A superfície impactadora foi um filme de Mylar coberto com uma fina película de vaselina diluída em tolueno a 2% (Miguel, 1981).

A identificação e quantificação dos elementos contidos nas partículas depositadas em cada estágio do impactador foi determinada pelo método PIXE. Nas amostras de aerossóis coletadas nas Instalações **A** e **B**, foram selecionados 5 elementos como os de interesse para a quantificação. O Th, por ser objetivo deste

estudo; urânio (U), por acompanhar o Th como impureza na rede cristalina; o nióbio (Nb), por ser o principal elemento em maior concentração; o chumbo (Pb), por sua toxicidade química; o zircônio (Zr) e o ítrio (Y), pelas linhas K de seus espectros de raios X, que se sobrepõem às linhas L do espectro de raios X do Th. Nas amostras de aerossóis coletadas na Instalação C, não foram identificadas partículas contendo Nb, Zr e Y. Deste modo, nesta instalação foram considerados como elementos de interesse apenas o Th, U e Pb.

A massa coletada em cada estágio do impactador em cascata é da ordem de microgramas. Tal massa é insuficiente para a extração do Th por processos químicos e posterior determinação da concentração de ^{232}Th e ^{228}Th nas frações inalável e respirável do aerossol, pelo método de espectrometria alfa.

5.1.2 AMOSTRADORES GROSSO E FINO (AGF)

As amostras de partículas, para determinação da concentração de ^{232}Th e ^{228}Th nas frações respirável e inalável dos aerossóis, foram coletadas com amostradores AGF (Amostradores Grosso e Fino). O princípio de funcionamento deste amostrador baseia-se nas propriedades aerodinâmicas das partículas. Como os furos dos filtros podem ser considerados como orifícios perfeitos, a eficiência de retenção depende do tamanho da partícula e da vazão, sendo determinado um diâmetro de corte para cada filtro (John et al. 1983 a e b). As amostras de partículas na fração respirável foram coletadas sobre filtros de Nuclepore^R com diâmetro de 47 mm e porosidade de 0,4 μm . As amostras de partículas na fração inalável foram coletadas sobre filtros do mesmo tipo, com porosidade de 8,0 μm . A vazão de operação da bomba de vácuo foi mantida constante em 17 l/min, e o volume amostrado foi medido usando-se um integrador de volume.

A área dos filtros nos quais são coletadas as amostras nos amostradores do tipo AGF (diâmetro igual a 47 mm) permite a coleta de massas maiores do que as amostradas em cada estágio do ICN. Deste modo, a análise da concentração de tório é realizada através da extração e concentração do nuclídeo empregando métodos radioquímicos, seguidos da determinação da atividade na amostra por espectrometria alfa.

5.1.3 AMOSTRADORES INDIVIDUAIS DE LAPELA

Como os trabalhadores movimentam-se dentro da instalação, os amostradores podem não representar adequadamente a incorporação de partículas pelos trabalhadores. Para determinar a concentração de tório respirada pelos trabalhadores, durante sua rotina de trabalho, os mesmos usaram amostradores individuais de lapela com ciclones, que selecionam as partículas da fração respirável do aerossol.

Estes amostradores possuem uma bomba de aspiração, que é presa à cintura do trabalhador, e o coletor de poeira é preso junto à lapela do uniforme (Lippmann & Harris, 1962; Lippmann & Chain, 1974). O princípio de funcionamento destes amostradores, assim como o do AGF e impactadores, baseia-se nas propriedades aerodinâmicas das partículas (Hinds, 1982). A vazão operacional foi mantida constante, 2,5 l/min, conforme recomendado pelo fabricante.

A análise da concentração de ^{232}Th e ^{228}Th , nas amostras coletadas com o amostrador de lapela, é realizada através da extração e concentração do nuclídeo. Para tal, são empregados métodos radioquímicos de extração e concentração do tório, seguidos da determinação da atividade na amostra por espectrometria alfa, conforme especificado no item 5.4.2.

5.1.4 CALIBRAÇÃO DOS MEDIDORES DE FLUXO

As vazões das bombas de vácuo usadas nos amostradores de ar, nos três arranjos para coletar amostras de aerossóis, foram ajustadas usando um medidor de fluxo padrão-primário (método de bolha) da marca Gilian[®] "The Gilibrator", antes de cada visita. Os rotâmetros e integradores de volume, que seriam usados nas coletas de amostras para determinar o volume amostrado, foram aferidos usando este medidor de fluxo padrão-primário, antes de cada visita.

A variação das vazões de cada medidor em relação à vazão média foi 20%.

Na Figura 5.1 é apresentada a fotografia mostrando os três amostradores usados para coletar amostras de aerossóis. O ICN está a direita na foto, conectado ao integrador de volume usado para determinar o volume amostrado e a bomba de vácuo; o AGF, está no centro da foto, e a sua frente estão os suportes de filtro e a esquerda o amostrador individual de lapela, a bomba e o suporte de filtro com o ciclone.

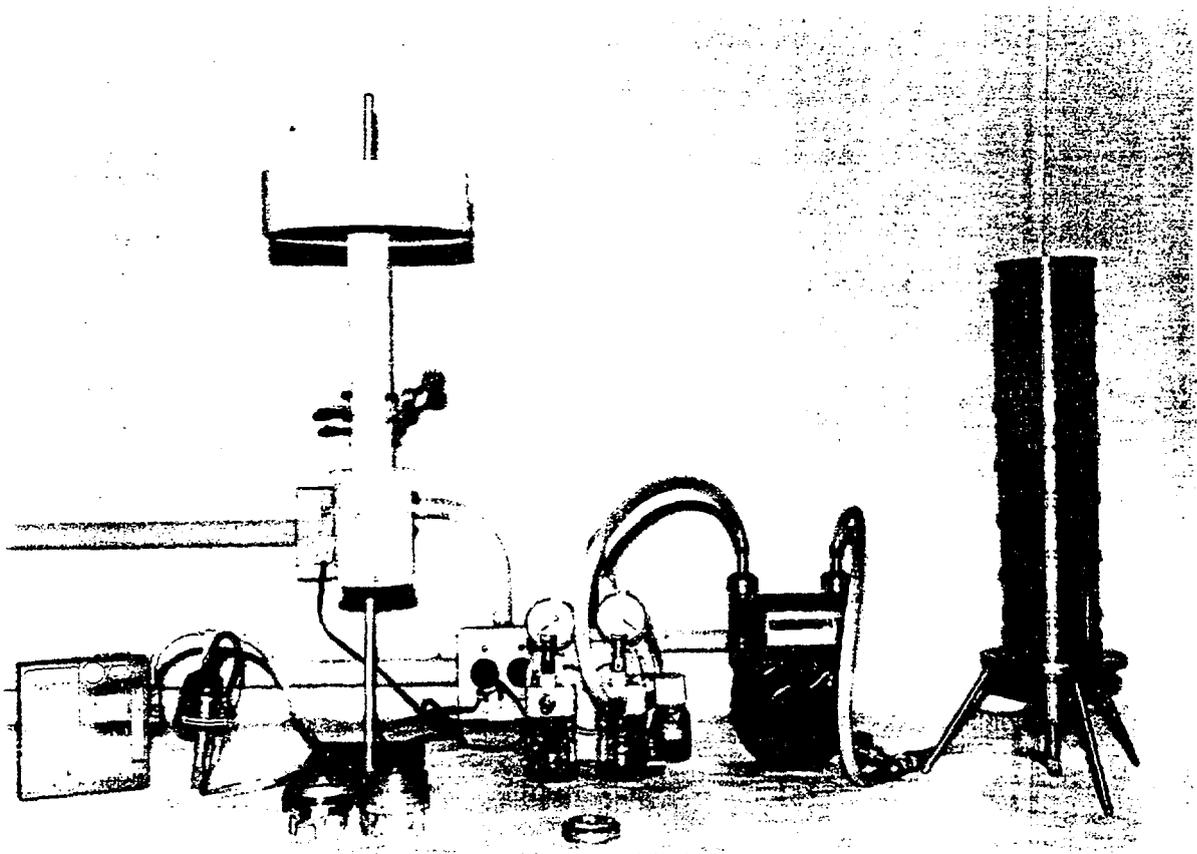


Figura 5.1 Fotografia dos três amostradores usados para coletar amostras de partículas de aerossóis.

5.2 AMOSTRAS BIOLÓGICAS

Nas Instalações B e C foram selecionados trabalhadores para monitoração *in vitro*. Os trabalhadores selecionados estavam expostos a aerossóis nas diferentes etapas do beneficiamento do minério, e nas principais etapas de confecção das camisas para lampiões, durante as quais foram realizadas as amostragens de ar. O grupo controle foi formado por moradores da cidade do Rio de Janeiro, RJ, não ocupacionalmente expostos a poeira de minério. Tanto para o grupo de trabalhadores como para o grupo controle, não houve seleção entre fumantes e não fumantes, nem por idade (desde que fossem adultos), nem por sexo, ou tipo de dieta alimentar. Entre os trabalhadores, não foi feita seleção em relação ao tempo de serviço.

As amostras de fezes e urina foram coletadas fora do local de trabalho, em

potres plásticos fornecidos aos trabalhadores, para evitar contaminação durante a coleta.

As amostras de fezes foram analisadas pela técnica de espectrometria alfa para determinação da concentração de ^{232}Th e ^{228}Th .

As amostras de urina foram analisadas por espectrometria de massa (ICP-MS) para determinação da concentração de Th nas amostras.

5.3 AMOSTRAS COLETADAS

5.3.1 INSTALAÇÃO A

As amostras de aerossóis foram coletadas em duas visitas feitas à instalação, na época da seca na região. A segunda visita foi realizada um ano após a primeira.

Durante a primeira visita, foram coletadas 15 amostras com o ICN, 11 com os AGF e 14 com os amostradores de lapela. Os detalhes dos locais escolhidos, data, volume de ar amostrado e o período de coleta, para cada uma das amostras, são apresentados no Apêndice A, nas Tabelas A.1, A.2 e A.3.

Durante a segunda visita, foram coletadas 4 amostras com o ICN, 7 com os AGF e 2 com amostradores de lapela. Foram escolhidos os pontos que apresentaram maior concentração na primeira visita.

Como a vila residencial está localizada no interior da área da mineradora, foram coletadas amostras de aerossóis em uma residência, na primeira e segunda visitas, para avaliar a exposição dos familiares.

Os detalhes dos locais escolhidos, data, volume de ar amostrado e período de coleta, para cada uma das amostras, são apresentados no Apêndice A, nas Tabelas A.4, A.5 e A.6.

5.3.2 INSTALAÇÃO B

As amostras de aerossóis foram coletadas em duas visitas feitas à instalação. A primeira foi realizada na época das chuvas na região. A segunda foi realizada 3 anos após a primeira visita, porém na época da seca.

Em ambas as visitas, foram coletadas amostras de aerossóis com os amostradores de área: impactador em cascata, amostradores AGF, e com amostradores individuais de lapela.

Durante a primeira visita, foram coletadas 10 amostras com o ICN, 5 com os AGF e 1 com o amostrador de lapela. Os detalhes dos locais escolhidos, data, volume de ar amostrado e período de coleta, para cada uma das amostras, são apresentados no Apêndice B, nas Tabela B.1 e B.2.

Na segunda visita, foram coletadas 7 amostras com o ICN e 6 com os AGF. Os detalhes dos locais escolhidos, data, volume de ar amostrado e o período de coleta, para cada uma das amostras, são apresentados no Apêndice B, nas Tabelas B.3 e B.4.

Os 11 trabalhadores que se dispuseram a colaborar com o nosso projeto usaram os amostradores de lapela durante toda a sua atividade de rotina na mineradora. A estes, foram solicitadas amostras de fezes. A relação dos trabalhadores e o período de uso dos amostradores individuais são apresentados no Apêndice B1, na Tabela B.5.

Seis meses após a segunda visita, foram solicitadas amostras de fezes aos trabalhadores antes e depois das férias (intervalo de 30 dias). As amostras coletadas ao término das férias foram coletadas antes que os mesmos retornassem ao trabalho.

Aos trabalhadores que haviam fornecido as amostras de fezes (antes e após as férias), da Instalação B, foram solicitadas amostras de urina. Além destas, foram solicitadas amostras de urina a um grupo controle, que habitava a região, mas não estaria envolvido com o processo. Foram recebidas 5 amostras do grupo controle e 20 amostras de trabalhadores. Estas amostras foram analisadas por espectrometria de massa (ICP-MS) para determinação da concentração de Th.

5.3.3 INSTALAÇÃO C

As amostras de aerossóis foram coletadas durante duas visitas feitas à instalação. A segunda visita foi realizada 7 meses após a primeira.

Os pontos de coleta de amostras foram selecionados considerando-se a análise do fluxograma do processo e as etapas nas quais poderia haver maior risco de incorporação de partículas contendo Th. Baseamo-nos, também, nos dados obtidos durante uma visita anterior à instalação (Dias da Cunha et al. 1994).

Nesta instalação, os trabalhadores permanecem sentados na maioria das etapas, não havendo circulação dos trabalhadores nas áreas, durante a sua atividade

de rotina. O turno é de 8 h por dia, com 5 dias de trabalho por semana.

Nas duas visitas, foram coletadas 2 amostras com o ICN. Com amostradores de lapela, foram coletadas 5 na primeira visita e 5 na segunda. Os detalhes dos locais escolhidos, data, volume de ar amostrado e período de coleta, para cada uma das amostras, são apresentados no Apêndice C1, nas Tabelas C.1, C.2 e C.3.

5.4 TÉCNICAS ANALÍTICAS

As amostras de partículas transportados pelo ar, coletadas com o impactador em cascata, foram analisadas pelo método PIXE (*Particle Induced X Ray Emission*), para determinação da concentração da massa elementar e do tamanho da partícula, em cada estágio do impactador.

As concentrações de ^{232}Th e ^{228}Th nas frações respirável e inalável, coletadas com amostradores AGF e de lapela, foram determinadas por espectrometria α .

As amostras biológicas (fezes), fornecidas pelos trabalhadores e pelo grupo de controle, foram analisadas por espectrometria α , para determinação da concentração de ^{232}Th e ^{228}Th . As amostras de urina, fornecidas pelos trabalhadores e pelo grupo de controle, foram analisadas por espectrometria de massa (ICP-MS), para determinação da concentração de Th.

5.4.1 MÉTODO PIXE

As amostras foram irradiadas na câmara de espalhamento localizada em uma das linhas do acelerador Van de Graaff, de 4 MV, do Departamento de Física da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RIO). Foi usado um feixe de prótons de 2 MeV, com corrente na amostra da ordem de 10 nA.

Nas Figura 5.2 é apresentada uma vista parcial do arranjo experimental da montado na linha de PIXE do acelerador Van de Graaf da PUC-RIO. No primeiro plano é visto o tubo de aço que conduz o feixe até a câmara, a esquerda, o detector com vista parcial de seu recipiente de nitrogênio e ao fundo a câmara, com base em azul e a torre de suporte de alvo (amostra).

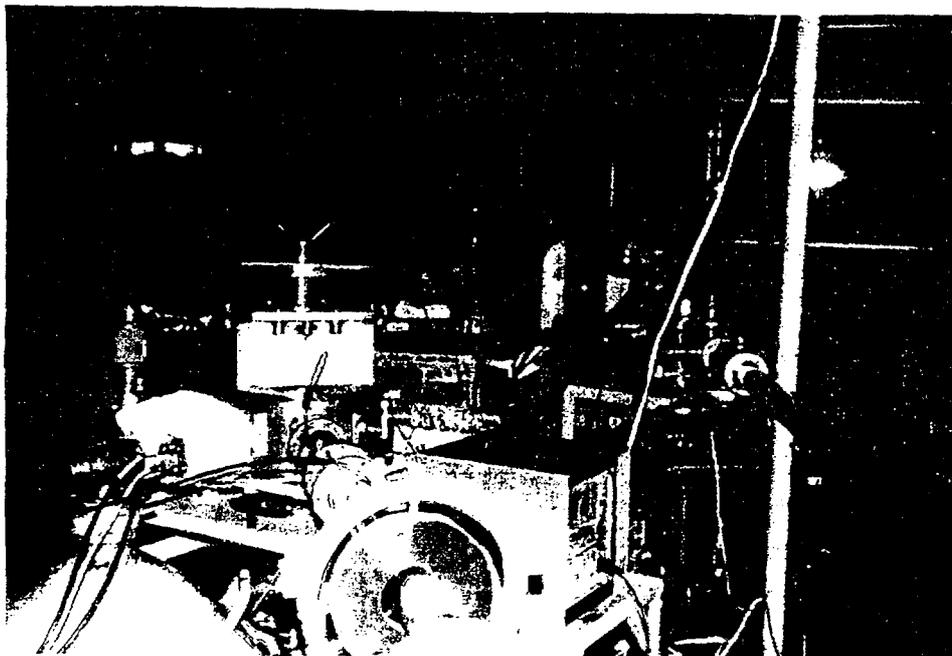


Figura 5.2 Arranjo experimental da linha de PIXE no Acelarador Van de Graaff, na PUC-RIO.

A torre de suporte de amostras da câmara de espalhamento permitiu colocar em vácuo, simultaneamente, 39 amostras montadas em um disco perpendicular ao feixe. A câmara foi mantida em vácuo de 1×10^{-6} torr. Na entrada do feixe na câmara, foram colocados dois colimadores de 4 e 5 mm de diâmetro cada um. O copo de Faraday, para determinação da corrente que passa pelo alvo, foi colocado diametralmente oposto à entrada do feixe na câmara. Na Figura 5.3 é apresentado o esquema da câmara de espalhamento. Para melhorar a eficiência de detecção, o detector foi colocado em vácuo a 135° em relação à direção do feixe incidente. O detector usado foi um semiconductor de Si-Li.

Os espectros de raios X detectados foram analisados em um analisador multicanal, com 1024 canais e transferidos para computadores, onde foram analisados. Na Figura 5.4, é apresentado o esquema da eletrônica usada para aquisição de dados.

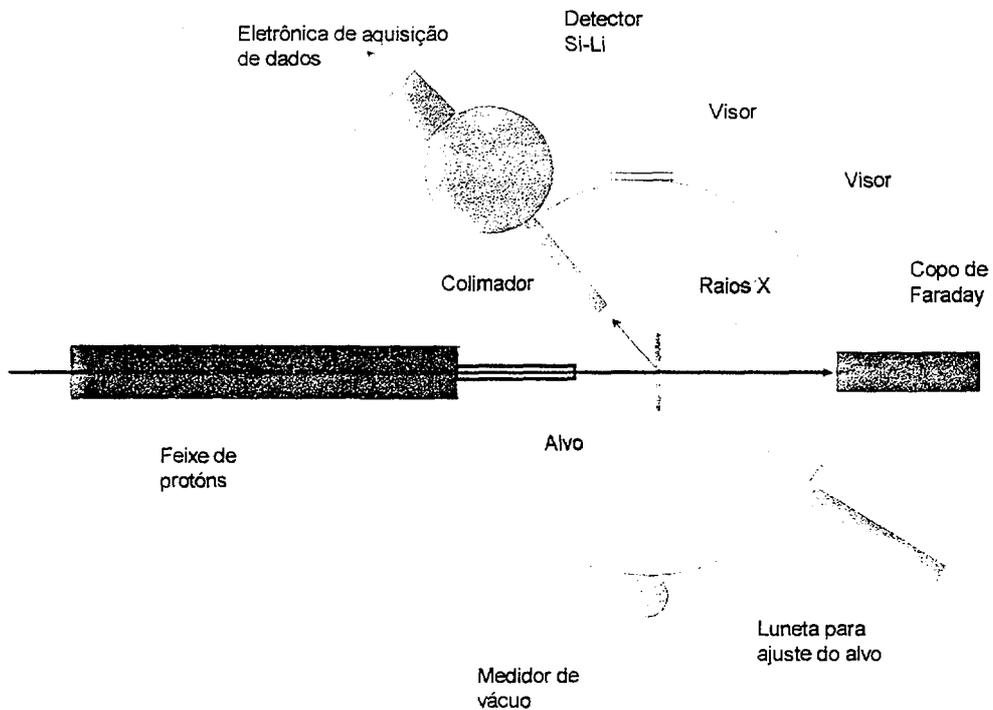


Figura 5.3 Esquema da câmara de espalhamento, montada na linha de PIXE.

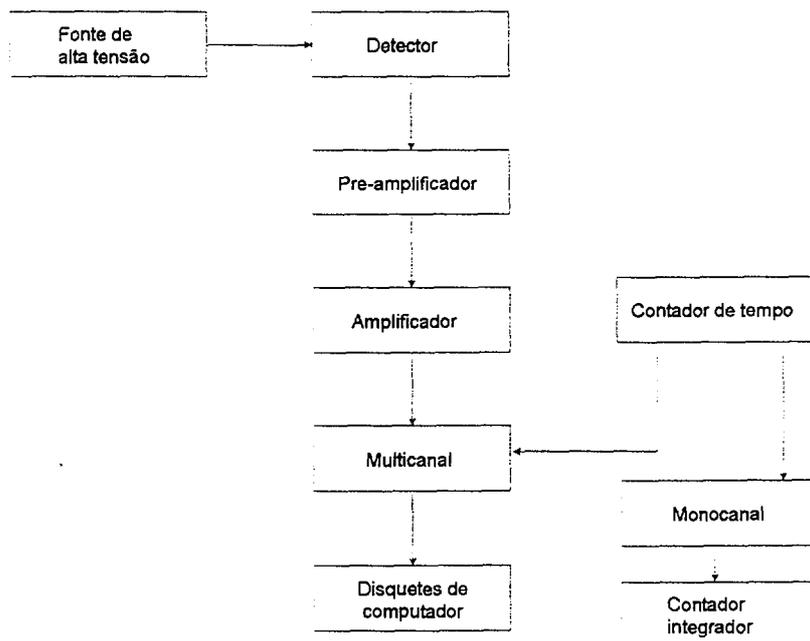


Figura 5.4 Esquema da eletrônica utilizada para aquisição dos espectros de raios X característicos emitidos pelo alvo (amostra).

Os espectros multielementares, obtidos das amostras, foram analisados com auxílio do computador, usando-se um programa que foi desenvolvido para este fim no Laboratório Van de Graaff (Barros Leite, a publicar). A contribuição de cada elemento presente na amostra foi determinada comparando-se o espectro multielementar com um espectro padrão. O espectro padrão é o espectro do elemento de interesse irradiado nas mesmas condições das amostras multielementares. O espectro padrão é sobreposto ao espectro da amostra e normalizado em relação à linha principal do elemento no espectro multielementar. Os espectros dos elementos leves foram normalizados em relação às linhas K_{α} e K_{β} ; os dos elementos pesados, em relação às linhas L_{α} e L_{β} . Após determinada a contribuição de cada elemento no espectro da amostra, o espectro deste elemento é subtraído do espectro multielementar.

5.4.1.1 Calibração

A eficiência de detecção do método PIXE foi determinada irradiando-se alvos padrões de massa conhecida, irradiados nas mesmas condições que as amostras. Este procedimento, descrito em detalhes na literatura, evita a necessidade de correções devido à geometria (Paschoa et al., 1977; Dias da Cunha, 1988).

No arranjo experimental usado, foram colocadas folhas de alumínio sobre a janela do detector, como absorvedor, usado para atenuar os raios X das linhas L, M, N,... de baixa energia, possibilitando obter-se um espectro com baixo ruído de fundo e, portanto, mais fácil de analisar.

As soluções padrões usadas na determinação da eficiência, foram depositadas sobre filmes de Mylar, com 2 μm de espessura, montados sobre anéis de alumínio. Esta geometria foi a mesma usada para as amostras de aerossóis e, também, para os alvos padrões monoelementares, utilizados na quantificação da massa de cada elemento.

A curva de eficiência relativa foi determinada pela razão entre as intensidade das linhas K_{α} e K_{β} dos elementos. A curva de eficiência absoluta foi obtida normalizando-se a curva de eficiência relativa em relação aos valores obtidos com uma fonte radioativa padrão, contada na mesma geometria da amostra. A fonte usada foi de ^{57}Co . Na Figura 5.5, é apresentada a curva de eficiência absoluta obtida para

a geometria deste trabalho.

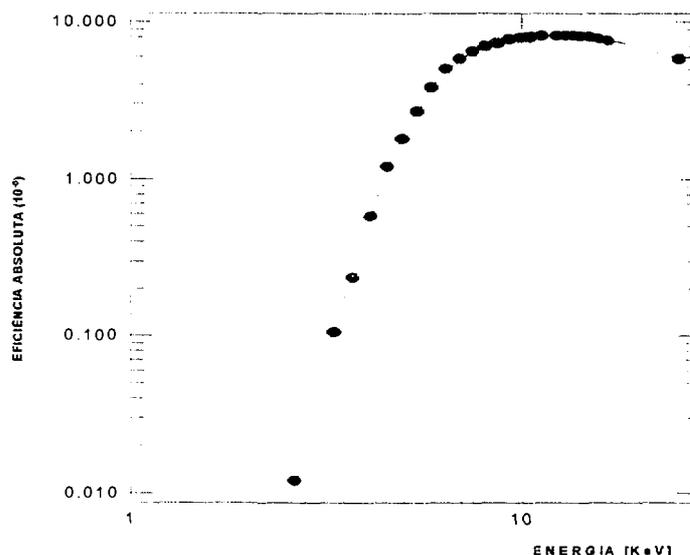


Figura 5.5 Curva de eficiência absoluta do método PIXE, no arranjo experimental usado.

O método PIXE foi testado usando amostras padrões calibradas. Foi usada uma solução padrão de Th com concentração de 0,095 mg/ μ l e uma solução padrão de nióbio com concentração de 0,045 mg/ μ l. O desvio da massa determinada experimentalmente pelo método PIXE, em relação à massa determinada gravimetricamente, foi 1,2%.

O limite de detecção foi determinado pela seguinte equação:

$$LD = 3 \sqrt{N_{x_{Bg}}} \quad 5.1$$

onde $N_{x_{Bg}}$ é o número de contagem da radiação de fundo na região de interesse

Foram determinadas duas curvas de limite de detecção. Uma para os elementos leves (número atômico (Z) ≤ 42), identificados pelas linhas K_{α} . Outra para os elementos pesados ($Z \geq 43$), identificados pela linhas L_{α} . Nas Figuras 5.6 e 5.7, são apresentadas as curvas dos limites para os elementos leves e pesados,

respectivamente. Estas curvas foram ajustadas aos pontos experimentais, com auxílio do programa SIGMAPLOT (Jandel Co.).

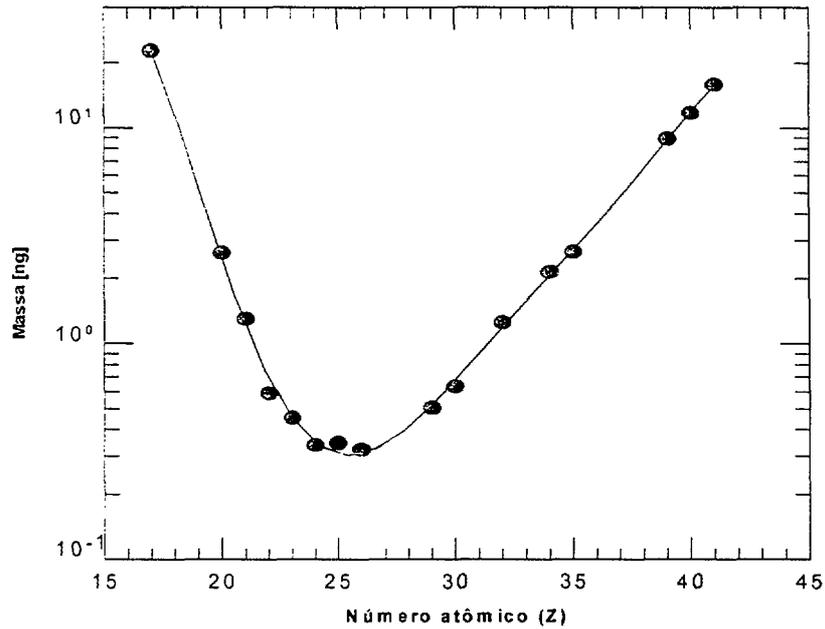


Figura 5.6 Curva do limite de detecção do método PIXE, para os elementos com número atômico ($Z \leq 42$).

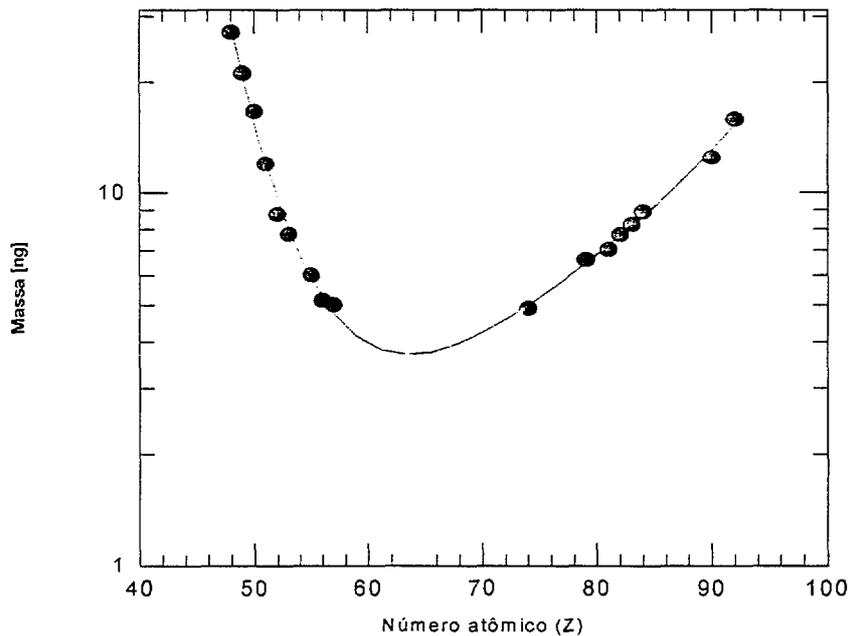


Figura 5.7 Curva do limite de detecção do método PIXE, para os elementos com número atômico ($Z \geq 43$).

O limite de detecção (LD) do método varia para cada elemento, está na faixa de 0,3 a 30 ng para toda a Tabela Periódica. Para os elementos leves, o limite de detecção mais baixo é o do ferro ($Z=26$, 0,32 ng). Para os elementos pesados, é do gadolínio ($Z=64$, 3,7 ng). O Th e o U apresentam limites de detecção de 12,5 e 15,4 ng, respectivamente.

O ruído de fundo da eletrônica e a contribuição do substrato na amostra foram determinados medindo-se a radiação emitida por um alvo branco, durante o mesmo tempo de contagem das amostras (10 min). O ruído encontrado foi considerado desprezível, na região de interesse do espectro.

A uniformidade do feixe foi obtida com o sistema de colimadores usados. Assim ao garantirmos que toda a amostra estava dentro da área do feixe, foram eliminadas as incertezas associadas à não uniformidade do feixe e não homogeneidade da amostra.

A distribuição da massa depositada em cada estágio do impactador em cascata não foi homogênea. O primeiro estágio do impactador possui área maior que a do feixe (Dias da Cunha, 1988). Assim, não foi considerada a massa coletada neste estágio para os cálculos do MMAD e da concentração.

5.4.2 MÉTODOS RADIOQUÍMICOS UTILIZADOS NA SEPARAÇÃO E CONCENTRAÇÃO DO TÓRIO E TÉCNICA DE ESPECTROMETRIA ALFA UTILIZADA PARA MEDIDA DA ATIVIDADE DE TÓRIO

A concentração de ^{232}Th e ^{228}Th nas amostras de aerossóis (amostradores AGF e de lapela) e de fezes foi determinada por espectrometria alfa. A identificação e quantificação dos isótopos presentes em cada amostra foi feita através dos espectros alfa de cada radionuclídeo presente na amostra.

O método de preparação de amostras já foi exhaustivamente discutido na literatura (Sachet et al., 1984; Azeredo et. al., 1991; Santos & Nascimento, 1995).

As amostras de excreta foram coletadas em potes plásticos e estocadas em congelador.

Na ocasião do preparo radioquímico, as amostras foram transferidas para cápsulas de quartzo e calcinadas em forno à temperatura de 400°C , por 24 h. A cinza seca era pesada e retirada uma alíquota de um grama, colocada em cadinho de

platina, e adicionado o traçador (^{229}Th).

As amostras de poeira de minério, coletadas sobre filtro de Nuclepore, eram colocadas em cadinhos de platina. Como nas anteriores, era adicionada uma gota do traçador (Th^{229}).

Na Figura 5.8, é apresentado o esquema dos métodos radioquímicos de extração e concentração de tório, nas amostras de aerossóis, coletadas com amostradores individuais de lapela e com AGF, e nas amostras de fezes.

A ambas as amostras era adicionado o fundente (mistura de 2:1 de H_3BO_4 e K_2CO_3).

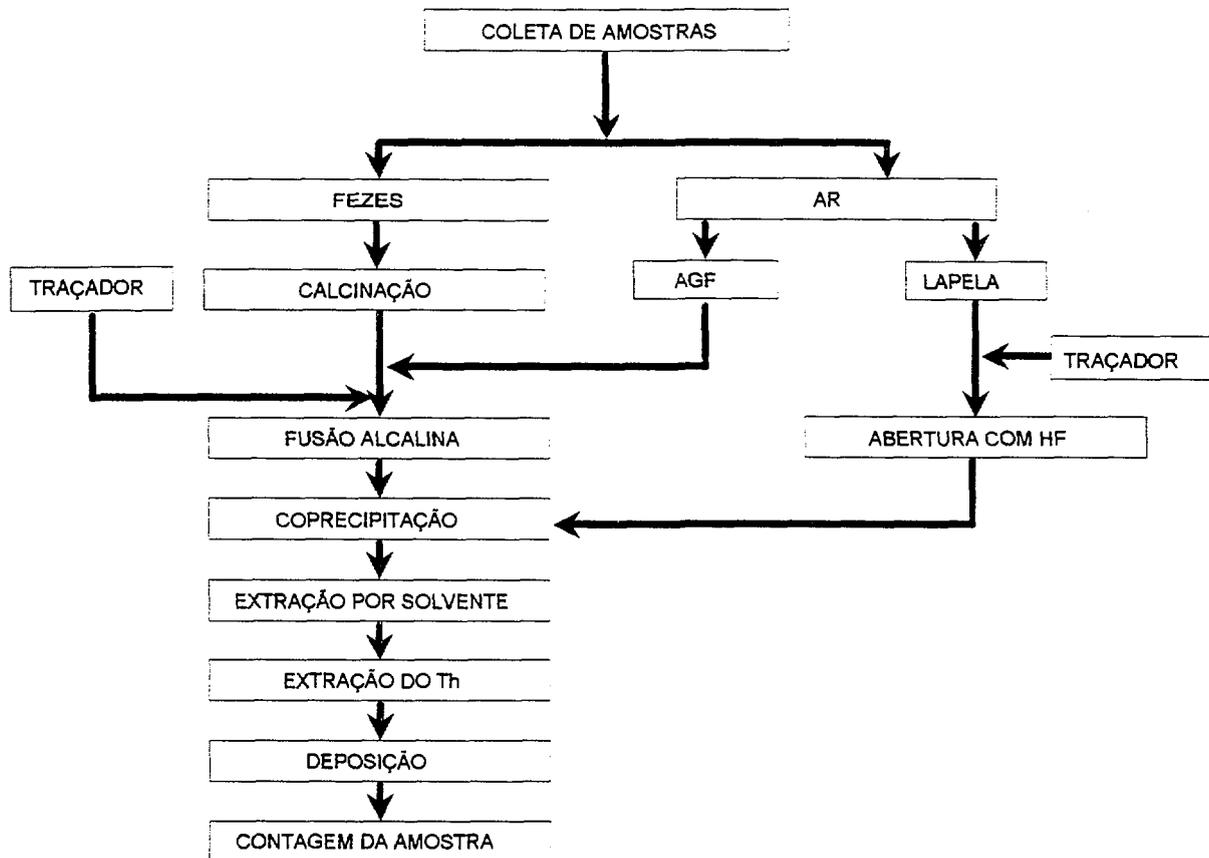


Figura 5.8 Esquema simplificado dos métodos radioquímicos de extração e concentração de tório.

O produto da fusão era resfriado e dissolvido em HCl 1N, sendo então transferido para um tubo de centrífuga. A co-precipitação era feita adicionando à amostra NH_4OH , até atingir pH 7.

Após a centrifugação, o precipitado era dissolvido em 3 ml de HNO₃ 8N. Quando a quantidade do precipitado era inferior a 10% do volume da amostra, eram acrescentados 5 ml de Ca(NO₃)₂ e 1 ml de H₃PO₄ 1,6M.

As amostras de poeira de minério, coletadas com os ciclones, eram colocadas em bequer de teflon, sendo acrescentada uma gota de traçador (Th²²⁹). Em seguida eram acrescentados HNO₃, H₂O₂ e HF concentrados. A solução era aquecida e evaporada até a secura. A solução era retomada acidificando-se com 3 ml de HNO₃ 8M e 10 ml de Al(NO₃)₃, seguindo-se a etapa de extração.

A extração do Th era feita transferindo-se a solução para funil de separação contendo 10 ml de alamina/xileno (1:10). A amostra era agitada por 5 min. Ao término da agitação, a amostra era mantida em repouso até a separação das fases. A fase aquosa era retirada e transferida para outro funil para segunda extração, após a qual a fase aquosa era descartada e as duas fases orgânicas combinadas. A remoção do Th da fase orgânica era realizada em duas re-extrações com 20 ml de HCL 7N cada. A solução era evaporada até a secura, sendo retomada em meio nítrico com 3 ml de HNO₃ 1N.

As amostras eram depositadas sobre uma placa de aço inox, coberta com um filme de óxido de tri-n-octilfosfin/vinol/ciclohexanona (TOPO). A solução em contato com o filme era agitada por 4 h, e o conjunto amostra/disco colocado para secar em mufla a 400°C por 1 h (Sachet et al., 1984).

As emissões das amostras eram contadas em um sistema de espectrometria α por 60 000 seg (16:h 40). Foram usadas 4 câmaras Ortec modelo 576 (EG&G Ortec) com detectores semi-condutores de Si-Li, do tipo barreira de superfície.

O espectro de emissores α foi analisado com auxílio do programa Maestro II, da Ortec (versão 3.0), que identifica as linhas e determina a área sob uma região de interesse. As concentrações de ²³²Th e ²²⁸Th foram determinadas normalizando as contagens para cada isótopo de interesse em relação ao traçador, adicionado à amostra.

O rendimento químico de cada amostra foi determinado em relação ao traçador adicionado no início do método. A eficiência do detector no arranjo experimental usado foi 30%, para as quatro câmaras.

A eficiência do método, para cada amostra, foi determinada considerando o

número de contagens na região do traçador e sua massa adicionada, através da seguinte equação:

$$\varepsilon = \frac{N_{xp}}{t m_p A_p} \quad 5.2$$

onde:

N_{xp} → número de partículas α emitidas pelo ^{229}Th e contadas no detector;

t → tempo de contagem da amostra (seg);

m_p → massa da gota do traçador (g);

A_p → atividade do traçador por grama (dps/g).

O rendimento químico foi determinado considerando a eficiência do detector e a eficiência total do método, a partir da equação a seguir:

$$RQ = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_D} \quad 5.3$$

onde:

RQ → rendimento químico;

ε → eficiência do método;

ε_D → eficiência do detector.

A concentração do isótopo de interesse (A), em Bequerel, para cada amostra, foi calculada considerando o número de partículas alfa detectadas na região de interesse (contagens na região de interesse), e a eficiência total do método para esta amostra. Deste modo, a concentração do isótopo de interesse foi determinada por:

$$A = \frac{N_{xa} - N_{xf}}{\varepsilon t} \quad 5.3$$

onde:

N_{xa} → número de contagens na região de interesse;

N_{xf} → número de contagens da radiação de fundo na região de interesse;

ε → eficiência do método;

t → tempo de contagem (seg).

Para as amostras de excreta, a concentração é normalizada em relação à massa de cinza analisada; no caso das amostras de ar, em relação ao volume de ar amostrado.

A atividade mínima detectada está associada ao rendimento químico do processo de separação, à eficiência de contagem do detector, à massa da amostra analisada e à contagem da radiação de fundo na região de interesse.

O limite de detecção do método foi determinado, para cada região de interesse do espectro, através da equação abaixo (Altshuller & Pasternack, 1963):

$$LMD = 2n \frac{\sqrt{(2R_2)}}{T_c \varepsilon 60} \quad 5.5$$

onde:

ε → eficiência do método;

T_c → tempo de contagem [min];

R_2 → contagem da radiação de fundo na região de interesse do espectro;

n → 2,58, para um nível de confiança de 99%.

O arranjo experimental usado apresentou baixo ruído de fundo na região de interesse. Na região do ^{232}Th , a contagem de fundo foi 12 em 60.000 seg. Os limites de detecção, para cada isótopo de interesse, são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 Limite de detecção do tório e urânio, na análise por espectrometria α .

^{232}Th	^{228}Th	^{238}U	^{234}U
[mBq]	[mBq]	[mBq]	[mBq]
1,0	1,2	0,9	1,0

Para verificar as possíveis contribuições nas amostras de possíveis contaminações oriundas de reagentes e/ou vidraria, todas as etapas da análise das amostras foram realizadas só com reagentes (ensaios em branco), nas três situações abaixo:

- i- processo desde o início, com todas as etapas sem filtro;
- ii- processo desde o início, com filtro de fibra de vidro ;
- iii- processo desde o início, com filtro de Nuclepore.

A análise dos resultados destes testes indicou que os reagentes e/ou vidraria não apresentaram traços de impureza na região de interesse do espectro.

5.4.3 DETERMINAÇÃO DO ERRO ASSOCIADO A CADA AMOSTRA

O valor mais provável do erro acumulado, E_0 pode ser calculado usando a equação abaixo (Lippmann b, 1989):

$$E_0^2 = E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 + \dots + E_n^2 \quad 5.6$$

onde:

E_1, \dots, E_n são os erros individuais expressos como percentagem.

O erro acumulado nas amostras de aerossóis, coletadas com amostradores AGF e individuais de lapela, foi determinado considerando-se o erro associado a técnica analítica e ao volume amostrado. O erro associado a técnica analítica foi 18% e a medida do volume, 20%. Assim, o erro acumulado nestas amostras foi 27%.

Nas amostras de aerossóis, coletadas com ICN, o erro associado a concentração foi 20%, considerando-se o erro associado a determinação da massa, 1,2% e ao volume, 20%.

Nas amostras de fezes, o erro acumulado foi determinado em 25%,

considerando-se o erro da técnica analítica 18% e da determinação da massa, 17%.

5.4.4 ESPECTROMETRIA DE MASSA ICP-MS

A espectrometria de massa no estado de plasma (ICP-MS) é um método relativamente novo para análise isotópica e elementar, que tem tido larga aplicação.

O ICP-MS permite uma análise rápida e direta do espectro de massa de elementos traços em soluções. Este método apresenta baixos limites de detecção para o Th e fornece de informações sobre a razão isotópica (Douglas & Houk, 1985).

No ICP-MS, uma fonte de rádio-freqüência, que envolve tubos co-axiais de quartzo, ioniza um fluxo de Argônio que circula entre estes tubos, formando o plasma. A amostra nebulizada é introduzida no equipamento e aquecida a 7 000 K, sendo os sólidos existentes na solução vaporizados, atomizados e ionizados. Ao atravessar o plasma, os íons formados são defletidos por um ímã quadrupolo para o sistema de detecção. Como os elementos apresentam diferentes deflecções, o ajuste do campo magnético permite a identificação dos elementos presentes na amostra. A quantificação dos elementos é feita através de cuidadosa calibração do sistema (Douglas & Houk, 1985).

O grau de ionização de um elemento pode ser calculado pela seguinte equação (Douglas & Houk, 1985):

$$\frac{M^+}{M^0} = \frac{1}{n_e} \left(\frac{2\pi m_e k T}{h^2} \right)^{3/2} \frac{Q^+}{Q^0} e^{-IP/kT} \quad 5.6$$

onde:

M^+ → massa da amostrada ionizada;

M^0 → massa da amostra não ionizada;

n_e → densidade de elétrons no plasma em cm^{-3} ;

m_e → massa do elétron;

k → constante de Boltzmann;

T → temperatura em graus Kelvin;

h → constante de Planck;

Q^+ → carga da amostra ionizada;

Q^0 → carga da amostra não ionizada;

IP → potencial de ionização do elemento.

O limite de detecção do método varia para cada elemento da Tabela Periódica. No entanto, no arranjo experimental usado na PUC-RIO, o limite de detecção é da ordem de nanogramas por microlitro, para toda a Tabela periódica. O limite de detecção depende do ruído de fundo e da sensibilidade do elemento de interesse. Normalmente, é definido como 3 vezes o desvio padrão da radiação de fundo na região do espectro do elemento de interesse. Os dados de literatura indicam que o limite de detecção para o Th é 0,03 ng/ml. A matriz da amostra pode causar interferência nos resultados das amostras. Embora não sejam encontrados na literatura muitos estudos sobre a interferência da matriz nos resultados das amostras, os estudos preliminares indicam que um conteúdo de sal inferior a 0,1% não causa interferência (Douglas & Houk, 1985).

5.4.4.1 Preparação das amostras

As amostras de urina foram preparadas retirando-se uma alíquota de 1 ml e diluindo-a em ácido nítrico (HNO_3) 1N, na razão 1:20. Para preparar a solução de ácido nítrico, foi usado ácido PA sem prévia destilação e água destilada e deionizada.

Na preparação das amostras foi usado ácido P.A. comercial, em lugar do ácido hiperpuro.

Para cada lote de amostras, foi preparada uma amostra contendo a solução do ácido usado na dissolução das amostras. O resultado obtido na análise destas amostras foi usado como concentração mínima detectável para nossas amostras. Aleatoriamente, foram selecionadas amostras das quais foram preparadas triplicatas e duplicatas.

As concentrações de Th foram determinadas em relação a um padrão interno de tálio, acrescido a cada amostra. As análises de ICP-MS foram solicitadas ao Departamento de Química da PUC-RIO.

A concentração mínima de tório foi considerada como a concentração determinada nas soluções de reagentes analisadas nas mesmas condições das

amostras. A concentração mínima detectável foi $0,25 \pm 0,03 \mu\text{g/l}$.

5.4.5 LIMITE DE DETECÇÃO DE ^{232}Th E DE ^{228}Th NAS AMOSTRAS DE AEROSSÓIS

Com relação as amostras obtidas utilizando o ICN, fazemos as seguintes considerações:

i) a contribuição, em massa, do urânio nas amostras do aerossol é menor que a contribuição do tório;

ii) que a razão entre a massa de ^{232}Th e ^{228}Th é aproximadamente 10^{10} . Podemos, então, considerar que a contribuição, em massa, de ^{228}Th e ^{230}Th , no espectro de massa das amostras, é desprezível.

Assim, podemos assumir que, no espectro de massa das amostras, toda a massa de tório analisada pelo método PIXE é devido ao ^{232}Th . Desse modo, as concentrações de ^{232}Th na fração respirável, nas amostras coletadas com ICN, foram estimadas considerando-se a massa determinada pelo método PIXE e a atividade específica do ^{232}Th .

Os limites de detecção da concentração de ^{232}Th e ^{228}Th nas amostras de aerossóis, foram calculados para cada método de amostragem utilizado. Eles foram calculados dividindo-se o limite de detecção da técnica analítica utilizada pelo volume médio amostrado.

Na Tabela 5.2 são apresentados os limites de detecção para cada um dos métodos de amostragem de ar.

Tabela 5.2 Limites de detecção do ^{232}Th e do ^{228}Th , nos três métodos de amostragem de aerossóis utilizados.

Amostrador	Limite de detecção (mBq/m ³)	
	^{232}Th	^{228}Th
AGF	0,7	0,8
Amostradores individuais de lapela	0,9	1,1
ICN*	0.02	-

* Considerando que toda a massa determinada por PIXE foi devido ao ^{232}Th .

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

A avaliação das condições de exposição dos trabalhadores a partículas contendo Th foi feita nas três instalações (**A**, **B** e **C**), através de visitas, nas quais foram observadas as condições de trabalho e as características de cada instalação.

Para avaliar a exposição dos trabalhadores a partículas contendo Th, foi necessário caracterizar as frações respirável e inalável dos aerossóis.

Com o ICN, foram coletadas amostras para determinação do tamanho (MMAD) das partículas da poeira de minério contendo um ou mais dos elementos de interesse, e a concentração destes elementos na fração respirável.

As concentrações, em massa, dos elementos, na fração respirável da poeira de minério, foram determinadas somando-se as massas de cada elemento depositadas nos estágios 4 a 6 do impactador e dividindo-se o total pelo volume amostrado.

Foram coletadas amostras com o AGF e com amostradores individuais de lapela para determinação das concentrações de ^{232}Th e de ^{228}Th nas frações respirável e inalável do aerossol.

6.1 CARACTERIZAÇÃO DA POEIRA DE MINÉRIO NA INSTALAÇÃO A

6.1.1 CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS CONTENDO OS ELEMENTOS DE INTERESSE NA FRAÇÃO RESPIRÁVEL DA POEIRA DE MINÉRIO

Nesta instalação é feito o beneficiamento físico do minério para obtenção do concentrado de cassiterita, zirconita e niobato-tantalato. Foram considerados, como já foi dito no item 5.1.1, os seguintes elementos de interesse Th (tório), U (urânio), Pb (chumbo), Zr (zircônio), Y (ítrio), e Nb (nióbio).

Na Figura 6.1 são apresentados os locais, nos quais foram coletadas as amostras durante a etapa de extração do minério, na usina de extração de minério do leito do igarapé (PF).

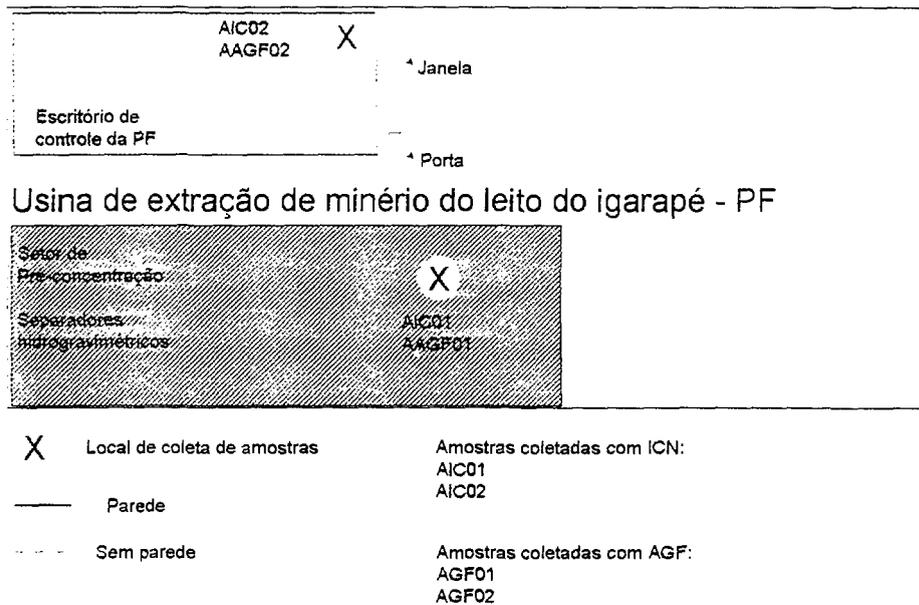


Figura 6.1 Esquema mostrando os locais, nos quais foram coletadas as amostras na usina de extração de minério do leito do Igarapé.

Na usina de extração de minério do leito do Igarapé (PF), durante a primeira visita, (AIC01 e AIC02), a massa de cada um dos elementos de interesse depositada nos estágios 1 a 5 do ICN estava abaixo do limite de detecção do método PIXE. No sexto estágio foram identificadas as linhas de raios X do Fe, Nb, Zr e Th, indicando que nesta etapa do processo eram geradas partículas menores que 1 μm .

Na Figura 6.2 são apresentados os locais, nos quais foram coletadas as amostras no Morro do Primário.

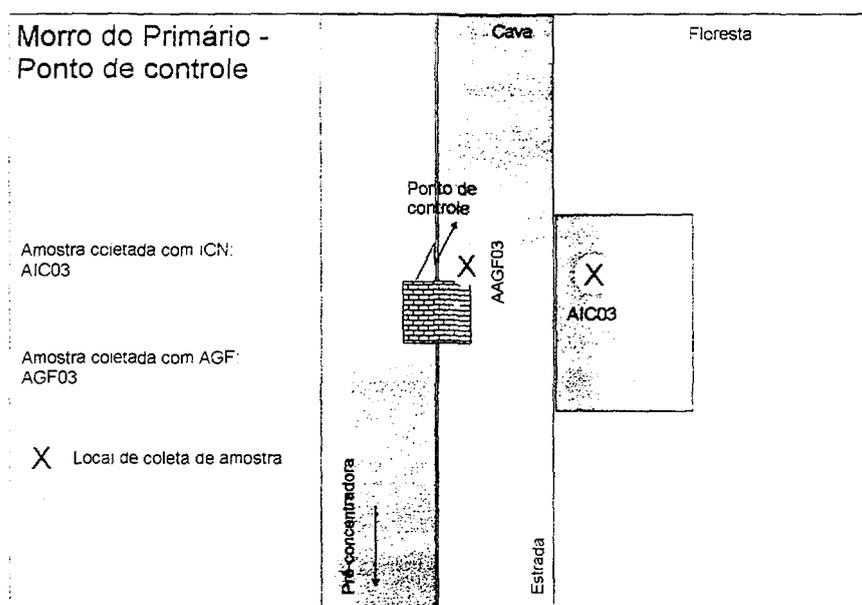
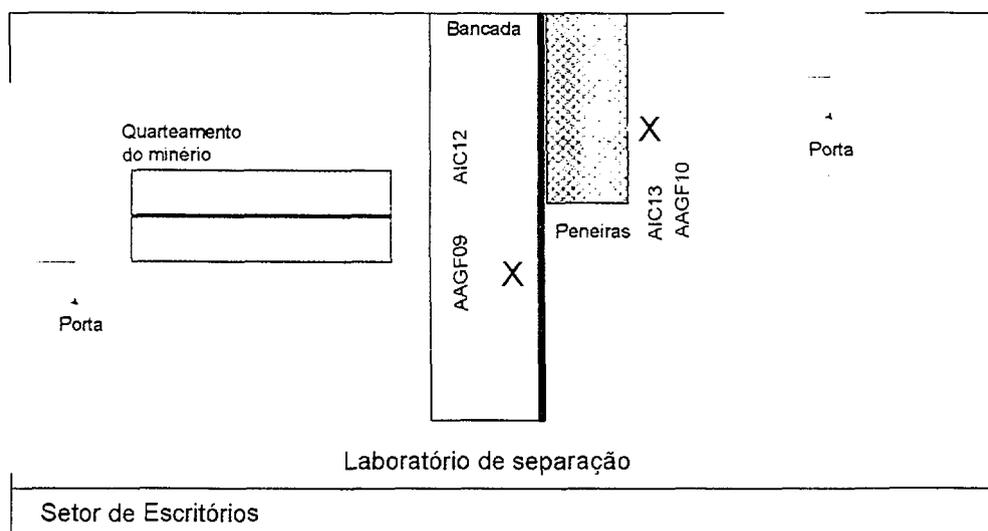


Figura 6.2 Esquema mostrando os locais, nos quais foram coletadas as amostras no Morro do Primário.

Na Figura 6.3 são apresentados os locais, nos quais foram coletadas as amostras no laboratório de controle de qualidade do minério.



Amostras coletadas com ICN:

AIC12
AIC13

Amostras coletadas com AGF:

AAGF09
AAGF10

X Local de coleta das amostras

Figura 6.3 Esquema mostrando os locais, nos quais foram coletadas as amostras no laboratório de controle de qualidade do minério.

No Morro do Primário, junto ao ponto de controle (AIC03) e no laboratório de controle qualidade do minério, durante o quarteamento das amostras de minério e durante a separação granulométrica por peneiras (AIC12 e AIC13), as massas de Th, U, Pb, Zr, Y, e Nb depositadas nos estágios 2 a 6 do ICN estavam abaixo do limite de detecção. No primeiro estágio do impactador, foram identificados os elementos de interesse. Como as partículas contendo os elementos de interesse se depositaram no primeiro estágio do ICN, concluímos que, nestes locais, as partículas transportadas pelo ar, contendo Th, U, Pb, Zr, Y, e Nb, eram maiores que 19,4 μm .

Nas Figuras 6.4 e 6.5 são apresentados os locais, nos quais foram coletadas as amostras de aerossóis, nas Usinas de Beneficiamento de Minério UBM-1 e UBM-3, respectivamente.

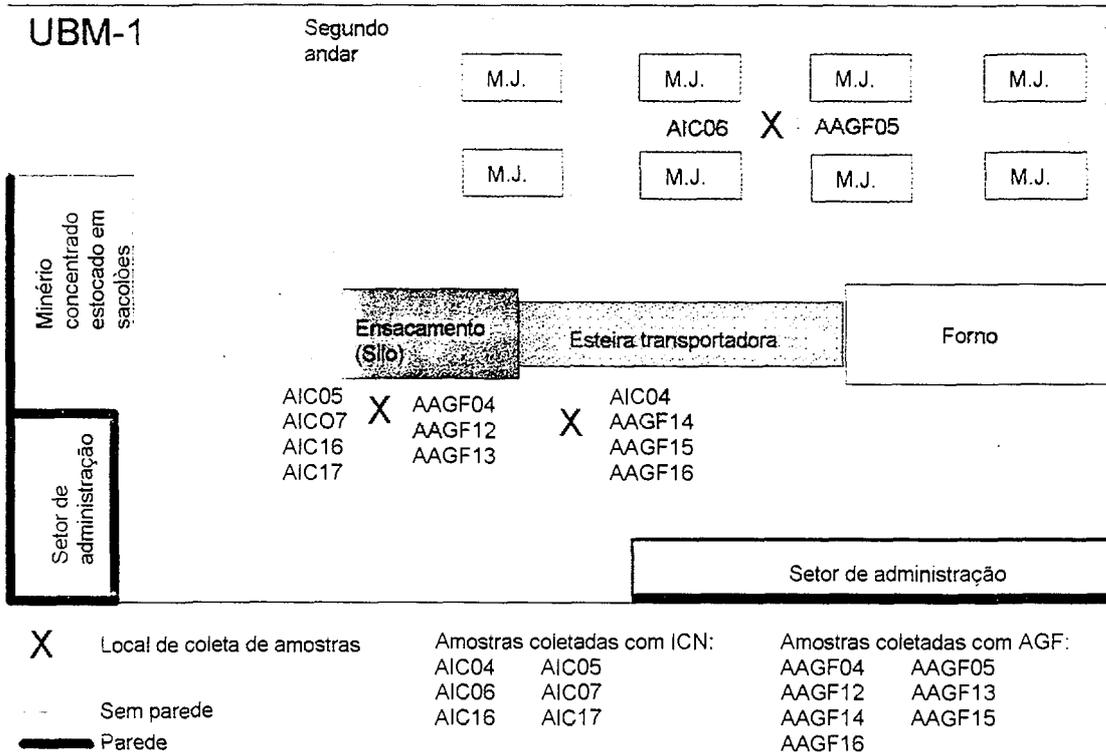


Figura 6.4 Esquema mostrando os locais, nos quais foram coletadas as amostras, na Usina de Beneficiamento de Minério (UBM-3).

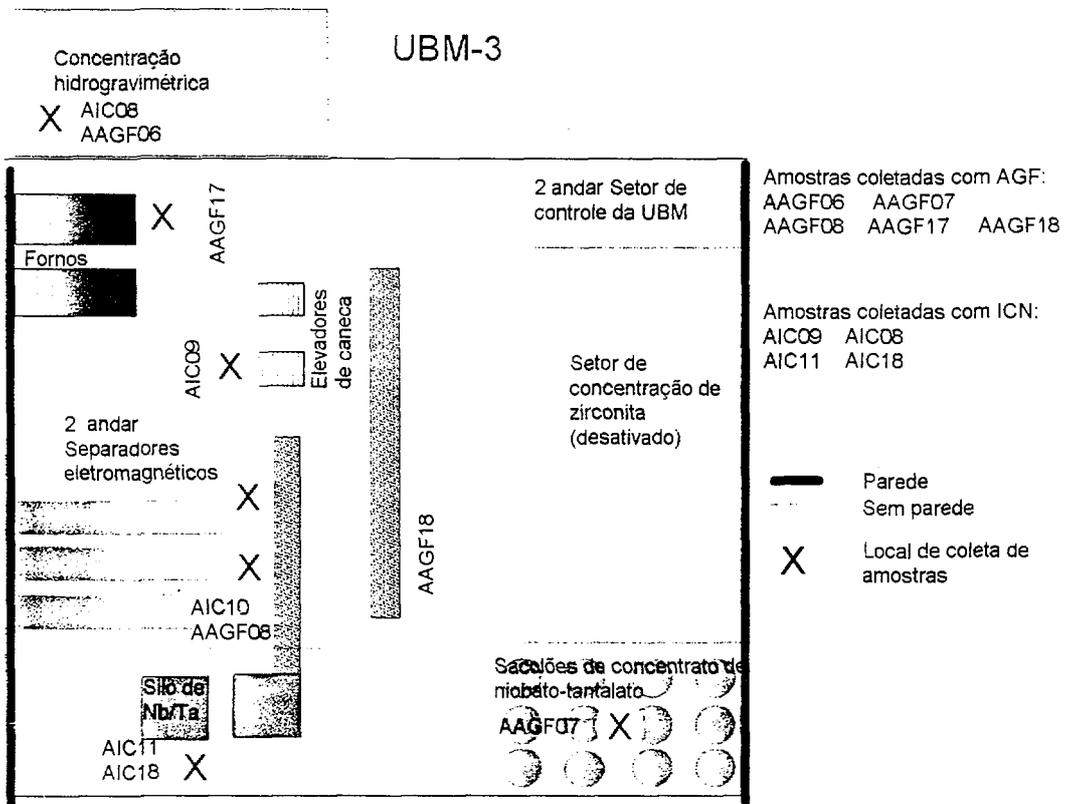


Figura 6.5 Esquema mostrando os locais, nos quais foram coletadas as amostras, na Usina de Beneficiamento de Minério (UBM-3).

Na (UBMs), durante a primeira visita, nas etapas de separação hidrogravimétrica do minério (AIC06 e AIC08), a massa de cada um dos elementos de interesse depositada nos seis estágios do ICN estava abaixo do limite de detecção.

Na primeira visita, foram determinadas as concentrações dos elementos de interesse, nas frações respirável e inalável da poeira do minério nas etapas de beneficiamento a seco do minério nas Usinas de Beneficiamento do Minério (UBM).

Com base nos resultados obtidos na primeira visita, foram selecionados os locais de coleta de amostras de poeira de minério na segunda visita. Assim, na segunda visita, foram coletadas amostras de aerossóis, apenas nas UBM-1 e UBM-3 e na casa da vila residencial.

Na Tabela 6.1 são apresentados os resultados das concentrações dos elementos de interesse nas UMBs, em cada etapa do processo, nas duas visitas feitas à instalação.

Tabela 6.1 Concentração dos elementos de interesse na fração respirável da poeira de minério. Amostras coletadas com o ICN na instalação A.

Etapa	Local	Visita	Código	Concentração ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)						
				Elementos						
				Th	U	Nb	Zr	Pb	Fe	Y
UBM-1	Est.	1	AIC04	0,08	0,06	0,44	0,12	0,16	4,99	0,07
	Silo	1	AIC05	0,23	0,12	0,97	0,40	0,36	17,5	0,09
	Silo	1	AIC07	0,14	0,06	0,69	0,33	0,08	9,21	0,05
	Silo	2	AIC16	0,16	0,05	0,76	0,17	0,03	1,46	0,04
	Silo	2	AIC17	0,17	0,05	1,09	0,50	0,08	6,19	0,06
UBM-3	Elev.	1	AIC09	0,58	0,22	1,72	1,43	0,91	12,12	<LD
	Sep.	1	AIC10	0,70	0,33	3,52	2,31	1,48	22,68	0,22
	Silo	1	AIC11	0,52	0,44	6,61	2,41	2,93	50,22	<LD
	Silo	2	AIC18	0,13	0,07	0,94	0,59	0,11	1,28	0,43

Est. = esteira transportadora de minério

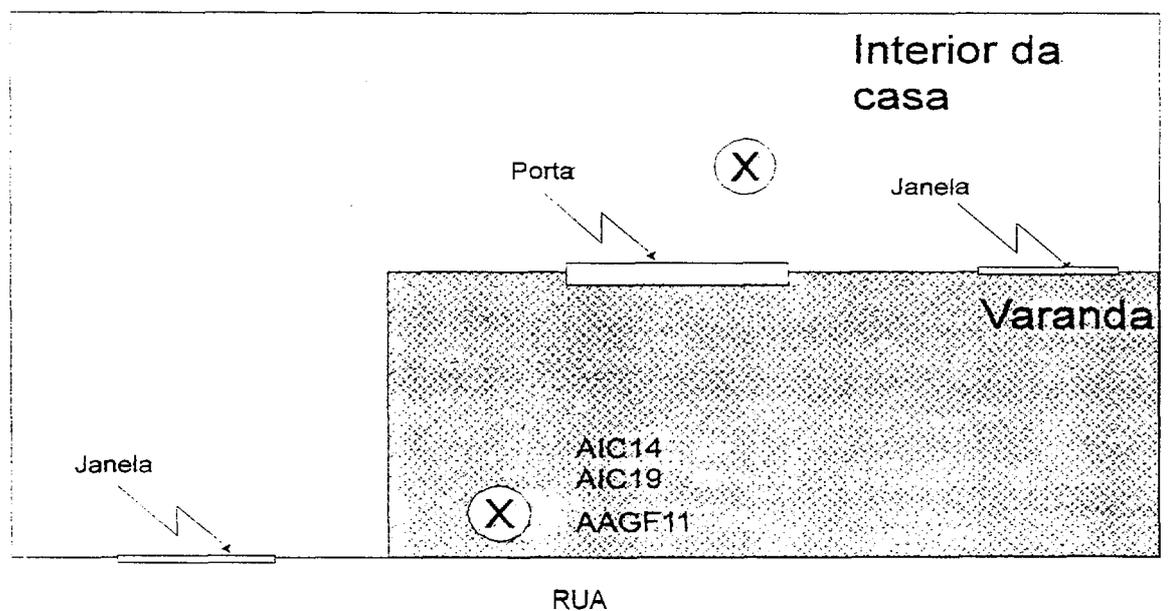
Elev. = Elevadores de canecas

Sep. = separadores eletromagnéticos

Estas concentrações indicam que, dentre os elementos de interesse, a concentração de Fe foi a mais alta em todas as etapas do processo. Em cada uma das amostras de aerossóis coletadas as concentrações de Fe, Nb e Zr foram maiores

que as concentrações de tório. Já as concentrações de U foram menores que as concentrações de Th, em cada uma das amostras coletadas. A maior concentração de Fe, na fração respirável, foi $50,22 \mu\text{g}/\text{m}^3$, na (AIC11) amostra coletada durante o ensacamento do niobato-tantalato, e a de Th, $0,70 \mu\text{g}/\text{m}^3$, na (AIC10) amostra coletada durante a separação eletromagnética. Em 5 das 9 amostras de aerossol coletadas com ICN, nas UBMs, as concentrações de Pb foram maiores que as concentrações de Th. As concentrações de Nb variaram de 0,44 (AIC04) a $6,61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (AIC11) e as de Th variaram de 0,08 (AIC04) a $0,70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (AIC10).

Na Figura 6.6 são apresentados os local, nos quais foram coletadas as amostras na casa da vila.



Amostras coletadas com ICN:
AIC14 AIC15
AIC19

Amostra coletada com AGF:
AAGF11

(X) Local de coleta de amostras

Figura 6.6 Esquema mostrando os local de coleta de amostras na casa da vila.

Nas amostras de aerossóis coletadas, na casa da vila, a massa dos 7 elementos de interesse, em cada um dos estágios do impactador estava abaixo do

limite de detecção (AIC14, AIC15 e AIC19).

Os MMADs e σ_g (desvio padrão geométrico) das distribuições de tamanho das partículas contendo os elementos de interesse foram determinados em cada etapa do processo nas UBM. Os valores de MMADs e o σ_g determinados durante a primeira e na segunda visita são apresentados na Tabela 6.2.

Na determinação de MMAD de cada elemento, foram consideradas apenas as distribuições de massa, que eram, aparentemente, monomodais. Estas distribuições apresentaram valores de σ_g maiores que 1,2. O σ_g maior que 1,2 indica que a distribuição de tamanho das partículas não é monomodal. Entretanto, não foi identificada mais de uma moda, porque a faixa de tamanho das partículas coletadas em cada estágio do impactador não permitiu identificá-las.

Nas etapas de transporte de minério por esteira na UBM-1 (AIC04) e junto ao elevador de canecas, na UBM-3 (AIC09), foi possível identificar uma distribuição de tamanho bimodal, com uma moda maior que 4,7 μm e outra com uma moda menor. Na determinação do MMAD foi considerada apenas a distribuição de partículas menores que 4,7 μm .

Nas amostras de aerossóis coletadas nas duas visitas, o tamanho das partículas (MMAD) contendo Th variou de 1,1 a 1,8 μm e o das partículas (MMAD) contendo U, de 1,3 a 1,9 μm . O tamanho das partículas (MMAD) contendo Nb variou de 1,2 a 2,4 μm , e o das partículas contendo Zr, de 1,2 a 2,9 μm . O tamanho das partículas (MMAD) contendo Fe variou de 1,1 a 2,4 μm e o das partículas contendo Y, de 1,5 a 2,2 μm .

Tabela 6.2 Tamanho das partículas (MMAD) contendo os elementos de interesse e o σ_g . Amostras coletadas com o ICN na Instalação A.

Etapa	Local	Visita	Código	MMAD (μm)													
				Elementos													
				Th		U		Nb		Zr		Pb		Fe		Y	
ϕ	σ_g	ϕ	σ_g	ϕ	σ_g	ϕ	σ_g	ϕ	σ_g	ϕ	σ_g	ϕ	σ_g	ϕ	σ_g		
UBM-1	Esteira	1	AIC04	1,5	2,2	1,5	2,2	2,4	1,8	1,8	2,1	1,6	2,1	2,4	1,8	-	-
	Silo	1	AIC05	1,3	2,2	1,4	2,0	1,3	2,5	1,8	2,0	1,5	2,0	1,6	2,0	1,6	1,9
	Silo	1	AIC07	1,8	2,1	1,9	2,0	1,6	1,9	2,9	1,4	2,2	2,0	2,3	2,0	2,1	2,0
	Silo	2	AIC16	1,1	1,6	1,3	1,7	1,2	1,7	1,2	1,2	1,2	1,5	1,1	1,6	1,2	1,6
	Silo	2	AIC17	1,3	2,3	1,4	2,1	2,3	2,1	2,3	2,2	1,8	2,2	1,9	2,1	1,9	2,2
UBM-3	Elevadores	1	AIC09	1,5	2,2	1,7	2,2	2,4	1,8	1,8	2,1	1,6	2,1	2,4	1,8	-	-
	Sep. Ele.	1	AIC10	1,8	2,6	1,9	2,1	1,9	2,1	2,2	2,0	2,0	2,1	1,3	2,3	2,0	2,1
	Silo	1	AIC11	1,6	1,5	1,6	1,5	1,8	1,5	1,9	1,5	1,6	1,5	1,6	1,7	-	-
	Silo	2	AIC18	1,6	1,5	1,6	1,5	1,6	1,5	1,9	1,5	1,6	1,5	1,6	1,5	1,6	1,5

Esteira = esteira transportadora de minério
 Elevadores = elevadores de canecas
 Sep. Ele. = separadores eletromagnéticos
 MMAD = Diâmetro Aerodinâmico Mediano de Massa

6.1.2 CONCENTRAÇÃO EM ATIVIDADE DE ^{232}Th E DE ^{228}Th NAS FRAÇÕES RESPIRÁVEL E INALÁVEL DA POEIRA DE MINÉRIO

Na Tabela 6.3 são apresentadas as concentrações de ^{232}Th e de ^{228}Th nas frações respirável e inalável do aerossol, determinadas nas duas visitas, obtidas usando o amostrador do tipo AGF.

Tabela 6.3 Concentrações de ^{232}Th e ^{228}Th nas frações respirável e inalável da poeira de minério. Amostras coletadas com AGF, na Instalação A.

Etapa	Local	Visita	Código	Concentração (mBq/m ³)			
				^{232}Th		^{228}Th	
				Respirável	Inalável	Respirável	Inalável
PF	Sep.H.	1	AAGF01	<LD*	<LD*	12,0	7,5
	Esc.	1	AAGF02	<LD	<LD	10,6	6,8
Morro P.	P.C.	1	AAGF03	<LD	<LD	18,7	21,2
UBM-1	Silo	1	AAGF04	1,8	4,6	2,3	6,3
		2	AAGF12	<LD	<LD	1,7	2,7
		2	AAGF13	<LD	<LD	2,6	3,5
	Sep.H.	1	AAGF05	<LD	<LD	3,8	16,5
	Est.	2	AAGF14	<LD	1,7	2,4	3,4
		2	AAGF15	<LD	5,9	4,3	8,3
UBM-3	Sep. H	2	AAGF16	<LD	6,0	3,1	7,1
		1	AAGF06	<LD	<LD	2,4	31,6
	Sac.	1	AAGF07	8,0	8,7	30,8	33,3
	Sep.E.	1	AAGF08	1,8	5,9	2,8	6,7
	Forno	2	AAGF17	<LD	<LD	2,8	5,6
	Silo	2	AAGF18	<LD	<LD	2,2	3,2
L. C. Q.M.	Quart.	1	AAGF09	<LD	<LD	<LD**	<LD
	Pen.	1	AAGF10	<LD	<LD	2,8	5,9
Vila		1	AAGF11	<LD	<LD	<LD	11,0

L.C.Q.M. = Laboratório de controle de qualidade do minério.

Pen. = Separação gravimétrica da amostra de minério.

Quart. = Quarteamento da amostra de minério para controle de qualidade.

Morro P. = Morro do Primário.

P.C. = Ponto de controle

PF = Usina de extração de minério do leito do igarapé.

Esc. = Escritório

Sep. H. = Separadores hidrogravimétricos.

Sep. E. = Separadores eletromagnéticos.

Est. = Esteira transportadora de minério.

Sac. = Sacolões com concentrado de minério, para embarque.

Vila = Residência da vila

*Limite de detecção de ^{232}Th = 0,7 mBq/m³.

**Limite de detecção de ^{228}Th = 0,8 mBq/m³.

A caracterização da poeira de minério coletadas, nas frações respirável e inalável, na planta de extração de minério do leito do igarapé (PF), (AAGF01 e AAGF02), no Morro do Primário, junto ao ponto de controle (AAGF03), nas UBMs (AAGF05 e AAGF06), nas etapas de separação hidrogravimétrica, e na residência da vila (AAGF11), indicam que durante o período de coleta de amostras, a concentração de ^{232}Th nas frações respirável e inalável estavam abaixo do limite de detecção ($0,7 \text{ mBq/m}^3$).

As variações observadas nas concentrações de ^{232}Th , na frações respirável e inalável da poeira de minério, nas UBMs, nas amostras coletadas junto ao silo, durante o ensacamento do concentrado (AAGF04, AAGF12 e AAGF13), e junto aos sacolões com concentrado de niobato-tantalato (AAGF07) e durante a separação eletromagnética (AAGF08) foram devido ao tipo do minério processado e a variações nas condições de ventilação da área.

Nas amostras coletadas junto à esteira (AAGF14, AAFG15 e AAGF16), as partículas contendo ^{232}Th estavam na fração inalável da poeira de minério.

Na UBM-3, durante a segunda visita, os separadores eletromagnético não estavam funcionando e não havia sacolões estocados.

Nas duas visitas, em todas as etapas do processo, o aerossol gerado continha ^{228}Th , nas frações respirável e inalável do aerossol. As concentrações de ^{228}Th em geral foram maiores que as concentrações de ^{232}Th indicando o aparente desequilíbrio na série do ^{232}Th .

Considerando que toda contribuição, em massa, nas amostras de aerossóis analisadas por PIXE, é devido ao ^{232}Th , foram calculadas as concentrações, em atividade, de ^{232}Th nas amostras coletadas com ICN. As concentrações calculadas de ^{232}Th , a partir dados resultados obtidos com o ICN, são apresentadas na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 Concentração calculada de ^{232}Th , na fração respirável da poeira de minério. Amostras coletadas com ICN, Instalação A.

Etapa	Local	Visita	Amostra	Concentração de ^{232}Th (mBq/m ³)
UBM-1	Esteira	1	AIC04	0,3
		1	AIC05	0,9
	Silo	1	AIC07	0,6
		2	AIC16	0,6
		2	AIC17	0,7
UBM-3	Elevadores	1	AIC09	2,4
		1	AIC10	2,8
	Silo	1	AIC11	2,1
		2	AIC18	0,5

Esteira = esteira transportadora de minério.

Elevadores = elevadores de canecas.

Sep. eletromagnéticos = separadores eletromagnéticos.

A avaliação da exposição de cada trabalhador, individualmente, foi realizada solicitando a cada trabalhador que usasse um amostrador individual de lapela, com corte na fração respirável. Os trabalhadores selecionados, em cada etapa do processo, usaram os amostradores durante todo o turno de trabalho. As concentrações de partículas contendo ^{232}Th e ^{228}Th na fração respirável do aerossol, aos quais estes trabalhadores estavam expostos, são apresentadas na Tabela 6.5.

As concentrações de partículas transportadas pelo ar contendo ^{232}Th , nas amostras coletadas no laboratório de controle de qualidade do minério (AL01, AL02, AL03, AL04) e as concentrações de partículas contendo ^{232}Th nas amostras coletadas com os amostradores AGF e ICN, também, estavam abaixo do limite de detecção (0,7 mBq/m³ e 0,02 mBq/m³, respectivamente).

Na UBM-1, as concentrações médias de ^{232}Th e de ^{228}Th foram $2,5 \pm 0,6$ mBq/m³ e $12,6 \pm 0,07$ mBq/m³, respectivamente. Na usina de extração de minério do leito do Igarapé (PF), estas concentrações foram $2,0 \pm 0,2$ e $32,8 \pm 2,8$ mBq/m³.

No aerossol gerado durante a britagem do minério com britadores pneumáticos (AL14), a razão foi 0,9, indicando o equilíbrio entre estes dois radionuclídeos. O minério bruto, ainda em na forma de rocha, não sofreu ação dos processos erosivos e supergênicos superficiais. Nas demais amostras esta razão foi maior que 4, indicando o desequilíbrio da série do ^{232}Th nas amostras de aerossol.

Tabela 6.5 Concentrações de ^{232}Th e ^{228}Th na fração respirável da poeira de minério. Amostras coletadas com amostradores individuais de lapela, na Instalação A.

Etapa	Visita	Código	Concentração (mBq/m ³)		Razão $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$
			^{232}Th	^{228}Th	
Laboratório de controle de qualidade	1	AL01	<LD*	<LD**	-
	1	AL02	<LD	<LD	-
	1	AL03	<LD	<LD	-
	1	AL04	<LD	<LD	-
UBM-1	1	AL05	2,9	12,6	4,3
	1	AL06	2,1	12,5	6,0
	2	AL15	2,0	27,3	13,7
UBM-3	1	AL07	2,3	31,7	13,8
	1	AL08	<LD	11,0	-
	2	AL16	2,3	27,3	11,9
PF	1	AL09	1,8	30,8	17,7
	1	AL10	2,1	34,8	16,6
Morro do Primário	1	AL11	7,0	40,3	6,0
	1	AL12	5,8	38,2	6,6
	1	AL13	5,4	46,2	8,6
Britador	1	AL14	4,8	4,2	0,9

PF = usina de extração de minério do leito do Igarapé.

Morro do Primário = extração do minério na cava do Morro do Primário.

Britador = britador manual de minério.

* Limite de detecção de ^{232}Th = 0,9 mBq/m³.

** Limite de detecção de ^{228}Th = 1,1 mBq/m³.

6.2 CARACTERIZAÇÃO DA POEIRA DE MINÉRIO NA INSTALAÇÃO B

No estudo desenvolvido nesta instalação, foi avaliada a exposição de trabalhadores à poeira de minério e a incorporação de tório.

A principal diferença entre o processo de beneficiamento desta instalação e a Instalação A é o beneficiamento químico do minério para obtenção da liga Fe-Nb.

Deste modo, os aerossóis foram gerados por processos físicos: como britagem do minério, estocagem em silos e alimentação de tambores; britagem da liga Fe-Nb e processos químicos como lixiviação e aluminotermia.

Na etapa de metalurgia, o sistema de ventilação (exaustão dos gases) foi modificado após a primeira visita.

6.2.1 CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS CONTENDO OS ELEMENTOS DE INTERESSE NA FRAÇÃO RESPIRÁVEL DO AEROSSOL

Foram considerados como elementos de interesse, como visto em 5.1.1, U (urânio), Pb (chumbo), Zr (zircônio), Y (ítrio), Nb (nióbio) e Sr (estrôncio), além do Th (tório).

Na Tabela 6.6 é apresentada a concentração de cada elemento de interesse na fração respirável do aerossol.

Tabela 6.6 Concentração dos elementos de interesse na fração respirável do aerossol. Amostras coletadas com o ICN na instalação B.

Etapa do processo	Vi-sita	Código	Concentração ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)							
			Elementos							
			Th	U	Pb	Nb	Zr	Sr	Y	
Britagem	Brit. M	1	BIC01	0,56	0,72	0,87	3,05	0,78	<LD	<LD
		2	BIC11	1,45	1,49	<LD	2,79	0,59	1,91	<LD
		2	BIC12	0,48	0,26	0,15	1,08	0,38	0,65	<LD
	Brit. I.	1	BIC02	0,29	0,34	0,25	1,66	0,56	<LD	<LD
		Pilha M.	1	BIC03	0,26	0,31	0,34	1,70	0,56	<LD
			1	BIC04	0,18	0,22	0,74	7,45	0,37	<LD
Lixiviação	Ent.	1	BIC05	0,50	0,42	1,48	22,94	0,91	<LD	0,36
		1	BIC06	0,23	0,32	1,90	26,00	0,45	<LD	0,25
Metalurgia	Mistura	1	BIC07	3,09	1,78	63,64	108,44	2,64	<LD	2,48
		1	BIC08	1,91	2,95	52,44	112,89	2,45	<LD	1,31
		2	BIC13	0,57	<LD	<LD	22,40	0,45	0,25	<LD
		2	BIC14	0,68	<LD	0,29	20,83	0,55	0,28	<LD
	Brit.L.	1	BIC09	4,24	3,70	1,23	445,30	8,56	<LD	1,44
		1	BIC10	3,04	2,90	1,44	506,25	4,69	<LD	1,23
		2	BIC15	0,47	<LD	0,04	23,57	<LD	<LD	<LD
Brit.E.	2	BIC16	1,49	2,23	<LD	9,03	4,26	5,36	<LD	
	2	BIC17	1,78	2,03	<LD	8,56	3,86	4,82	<LD	

Brit. M. = britador do tipo mandíbulas Brit. I. = Britador do tipo mandíbulas
 Brit. L. = Britagem da liga Fe-Nb Brit. E. = Britagem da escória
 Ent. = Entamboramento Pilha M. = Pilha de minério

Na Figura 6.7 são apresentados os locais, nos quais foram coletadas as amostras na etapa de britagem do minério. Nesta etapa foram observadas as concentrações mais baixas de partículas contendo Nb (BIC01, BIC02, BIC03, BIC04 BIC011 e BIC12).

Britagem do minério

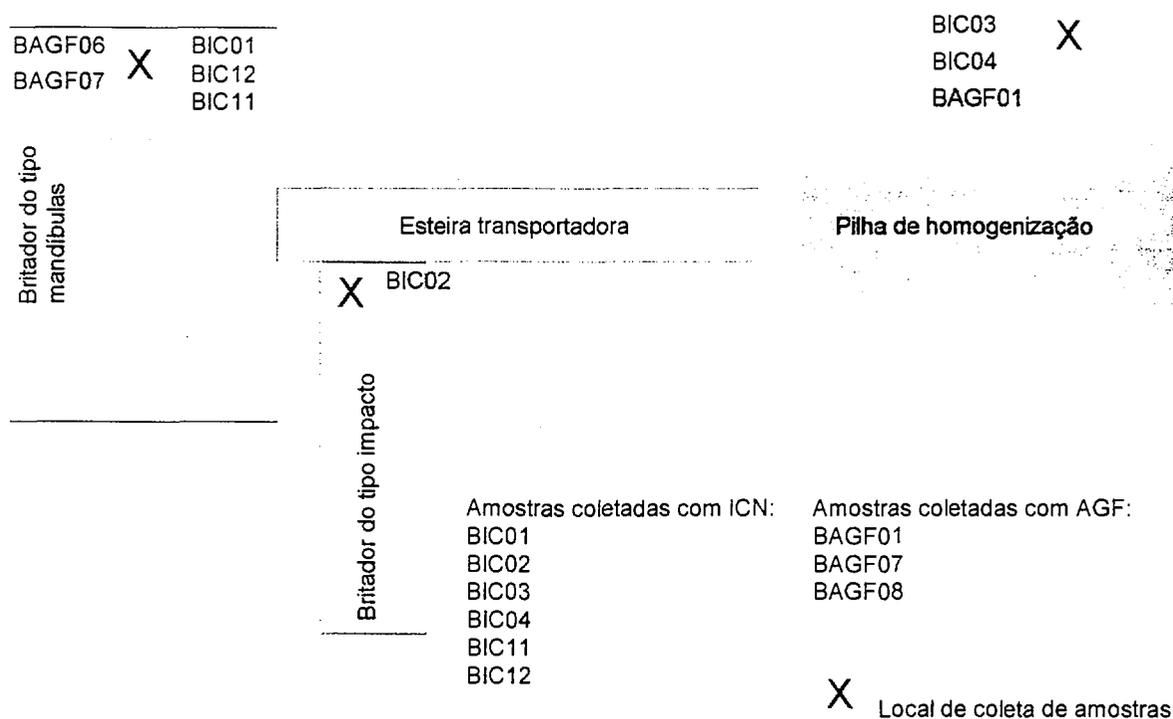


Figura 6.7 Esquema mostrando os locais, nos quais foram coletadas as amostras, na etapa de britagem do minério.

Os locais, nos quais foram coletadas as amostras de aerossóis no galpão onde eram realizadas as etapas de concentração e lixiviação, são apresentados na Figura 6.8.

Nas amostras (BIC05 e BIC06) coletadas durante a alimentação do tambor com concentrado de Nb, os trabalhadores estavam expostos a aerossol com concentrações maiores de Nb e Pb que as concentrações de tório.

Na Figura 6.9 são apresentados os locais, nos quais foram coletadas as amostras de aerossóis, no galpão onde era realizada a etapa de metalurgia. As maiores concentrações de partículas contendo Nb, na fração respirável do aerossol, foram observadas, nesta etapa do processo, durante a britagem da liga Fe-Nb, (BIC09 e BIC10 e BIC15) e no processo de produção da liga Fe-Nb por processo de aluminotermia (BIC07, BIC08, BIC13 e BIC14).

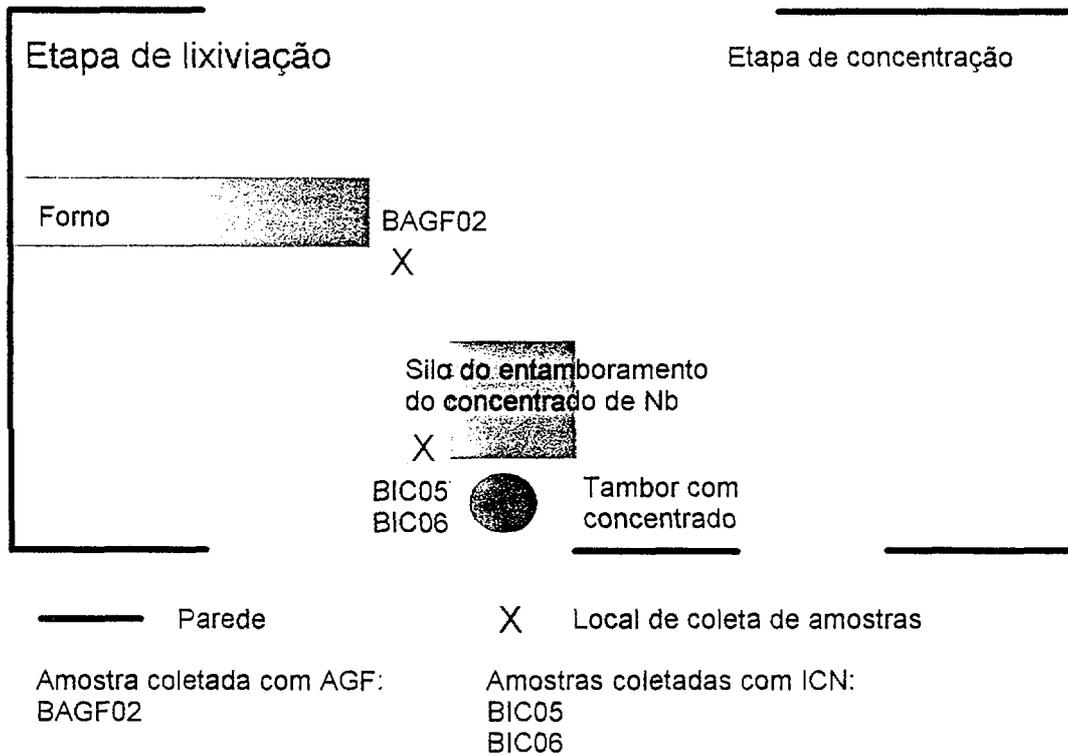


Figura 6.8 Esquema mostrando os locais, nos quais foram coletadas as amostras, no galpão onde era realizada a etapa de lixiviação.

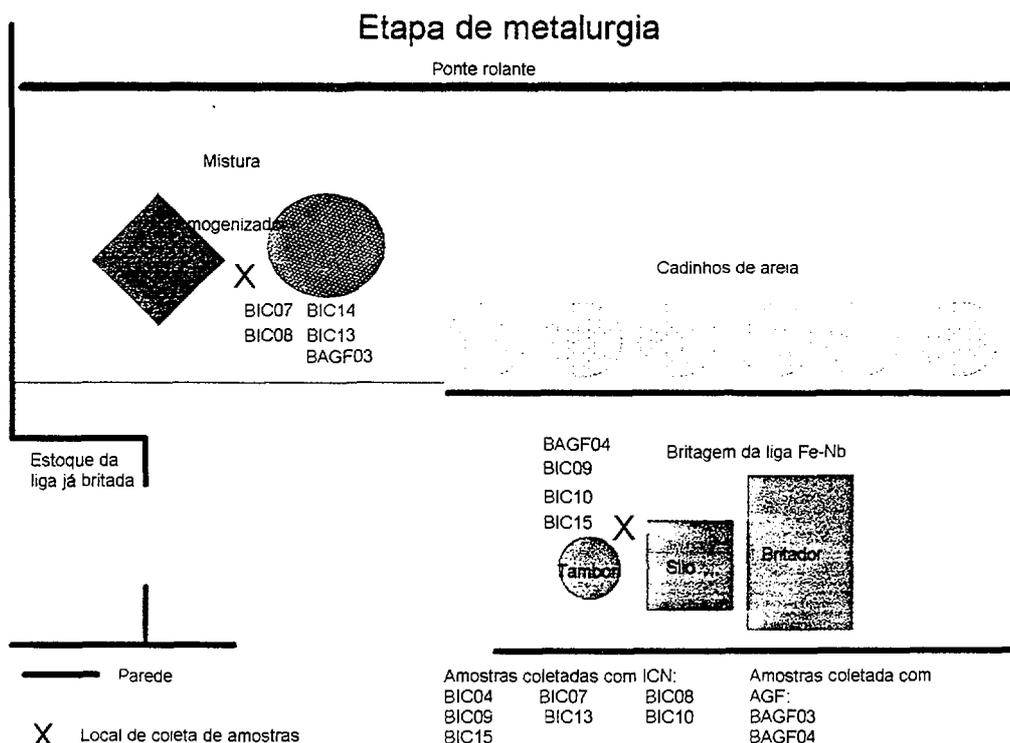


Figura 6.9 Esquema mostrando os locais, nos quais foram coletadas as amostras, no galpão onde ocorre a etapa de metalurgia.

Nesta etapa do processo, durante a segunda visita, a concentração de partículas contendo Pb, na fração respirável, era menor que a concentração durante a primeira visita.

Na Figura 6.10 é apresentado o local, no qual foram coletadas as amostras durante a britagem da escória.

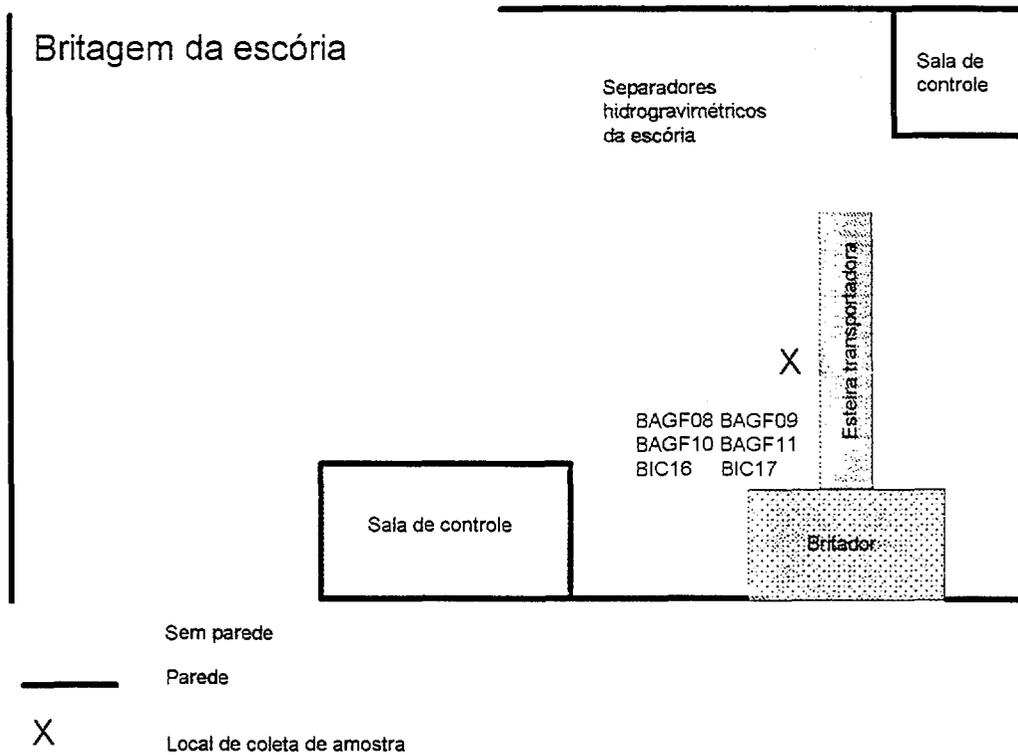


Figura 6.10 Esquema mostrando o local, no qual foram coletadas as amostras durante a britagem da escória.

As concentrações de partículas, contendo Zr, gerados no processo de aluminotermia (BIC13 e BIC14) na britagem da liga (BIC16 e BIC17) indicam que este elemento acompanhou a liga Fe-Nb, já que a maior massa desse elemento estava contida nas partículas geradas durante a britagem da liga e da escória.

Nesta instalação, as concentrações de Nb variaram de 506,25 a 1,08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e as concentrações de Th de 4,24 a 0,18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Comparando a concentração de Nb, com as concentrações dos demais elementos de interesse em todas as amostras a maior concentração foi de Nb. A concentração de Pb em cada uma das amostras coletadas durante a primeira visita foram maiores que a concentração de Th nestas amostras. Das 17 amostras coletadas, em 11 amostras as concentrações de Zr foram maiores que as

concentrações de Th.

Os MMADs e σ_g das distribuições de tamanho das partículas (MMAD) contendo os elementos de interesse foram determinados e são apresentados na Tabela 6.7.

Os valores de MMAD foram determinados para as partículas contendo os elementos de interesse usando os mesmos procedimentos adotados na Instalação **A**. Foi determinado o valor de σ_g correspondente a cada distribuição. As distribuições das partículas contendo cada um dos elementos de interesse apresentaram σ_g maior que 1,2, como na Instalação **A**.

As partículas geradas, na fração respirável do aerossol, durante a britagem da escória úmida (BIC16 e BIC17) continham Th, Nb, Pb, Zr, e Sr.

Tabela 6.7 Tamanho das partículas (MMAD) contendo os elementos de interesse e o σ_g . Amostras coletadas com o ICN, na instalação B.

Etapa	Local	Visita	Código	MMAD (μm)													
				Elementos													
				Th		U		Pb		Nb		Zr		Sr		Y	
ϕ	σ_g	ϕ	σ_g	ϕ	σ_g	ϕ	σ_g	ϕ	σ_g	ϕ	σ_g	ϕ	σ_g	ϕ	σ_g		
Britagem	Brit. tipo mandíbula	1	BIC01	1,9	1,9	1,9	1,7	1,9	1,8	2,2	1,7	1,8	1,8	-	-	-	-
		2	BIC11	1,6	2,0	1,7	1,9	-	-	1,6	2,1	1,2	2,2	1,3	2,3	-	-
		2	BIC12	1,1	2,1	1,1	2,0	2,3	2,1	1,3	2,5	1,1	2,5	1,0	2,4	-	-
	Brit. tipo impacto	1	BIC02	1,9	2,1	2,2	2,1	1,8	2,2	2,0	2,1	1,7	2,2	-	-	1,8	2,3
		Pilha de minério	1	BIC03	1,5	2,3	1,4	2,3	2,3	2,0	2,5	1,9	1,7	2,1	-	-	1,7
	1		BIC04	1,4	2,2	1,6	2,2	2,1	2,0	2,3	1,9	1,8	2,0	-	-	-	-
Lixiviação	Entamboramento	1	BIC05	2,1	2,0	2,0	2,1	3,1	1,7	3,3	1,6	2,4	2,0			2,2	2,1
		1	BIC06	1,8	2,1	1,5	2,3	2,4	1,9	2,6	1,9	1,6	2,7			1,7	2,2
Metalurgia	Mistura	1	BIC07	2,1	2,0	2,1	2,0	1,6	2,0	3,4	1,7	2,5	1,9	-	-	1,6	2,0
		1	BIC08	2,1	1,9	1,7	2,1	1,5	1,9	3,3	1,6	2,5	1,9	-	-	2,0	2,0
		2	BIC13	2,3	1,9	<LD	-	LD	-	3,1	1,6	2,5	1,9	1,4	1,8	-	-
		2	BIC14	2,1	2,0	<LD	-	1,5	1,9	2,9	1,7	2,0	2,0	2,1	2,0	-	-
	Britagem da liga Fe-Nb	1	BIC09	3,4	1,8	2,7	1,9	3,3	1,9	3,5	1,7	3,7	1,8	-	-	3,0	1,9
		1	BIC10	2,7	1,9	2,6	1,9	2,8	1,9	3,4	1,7	2,9	1,9	-	-	2,4	2,0
		2	BIC15	1,8	2,3	<LD	-	1,7	2,3	1,4	1,7	<LD	-	<LD	-	-	-
Britagem da escória	2	BIC16	2,3	2,0	2,2	2,0	LD	-	2,2	2,1	2,3	2,0	2,1	2,0	-	-	
	2	BIC17	2,4	2,1	2,2	1,9	LD	-	2,3	2,0	2,3	2,0	2,2	2,1	-	-	

Brit. tipo mandíbula = Britador do tipo mandíbula.

Brit. tipo impacto = britador do tipo impacto.

MMAD = Diâmetro Areodinâmico Mediano de Massa.

6.2.2 CONCENTRAÇÃO DE ^{232}Th E DE ^{228}Th NAS FRAÇÕES RESPIRÁVEL E INALÁVEL DO AEROSSOL

Na Tabela 6.8 são apresentadas as concentrações de ^{232}Th e ^{228}Th , nas diferentes etapas do processo, obtidas a partir de amostras coletadas utilizando amostradores do tipo AGF.

Tabela 6.8 Concentração de ^{232}Th e ^{228}Th na fração respirável e inalável do aerossol. Amostras coletadas com AGF, na Instalação B.

Etapa	Local	Vi-sita	Código	Concentração (mBq/m ³)				Razão	
				^{232}Th		^{228}Th		$^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$	
				Resp	Inal	Resp	Inal	Resp	Inal
Britagem	Pilha M.	1	BAGF01	<LD*	<LD	3,8	8,7	-	-
	Brit.M.	2	BAGF06	5,7	8,4	5,4	7,9	0,9	0,9
		2	BAGF07	5,5	7,8	5,4	7,9	1,0	1,0
Lixiviação	Forno	1	BAGF02	<LD	1,5	4,7	5,1	-	3,4
Metalurgia	Mistura	1	BAGF03	9,9	15,3	11,4	17,9	1,2	1,2
	Bri. L.	1	BAGF04	10,8	15,7	14,5	19,6	1,3	1,2
	Brit. E.	2	BAGF08	5,6	19,4	7,3	20,7	1,3	1,1
		2	BAGF09	<LD	26,9	<LD**	24,1	-	0,9
		2	BAGF10	<LD	8,4	<LD	7,1	-	0,8
	2	BAGF11	<LD	6,7	<LD	8,3	-	1,2	
Rest.		1	BAGF05	<LD	<LD	<LD	2,1	-	-

Rep. = Respirável.

Brit.M. = Britagem do minério.

Brit. E. = Britagem da escória.

Pilha M. = Pilha do minério.

*Limite de detecção de ^{232}Th = 0,7 mBq/m³.

**Limite de detecção de ^{232}Th = 0,8 mBq/m³.

Inal. = Inalável.

Bri. L = Britagem da liga Fe-Nb.

Rest. = Restaurante.

A amostra BAGF08 foi coletada 40 min após o término de britagem seca da escória e o início da britagem úmida da mesma. As demais amostras foram coletadas, em intervalos sucessivos de 1:30 h, aproximadamente. Nesta etapa do processo, a concentração de partículas na fração inalável do aerossol foi maior que na fração respirável. Como observado na Tabela 6.8, a concentração das partículas contendo Th foi diminuindo ao longo do tempo, indicando a precipitação das partículas.

Os trabalhadores estavam expostos a partículas contendo ^{228}Th em todas as etapas do processo. As variações nas concentrações de ^{232}Th e ^{228}Th , na fração respirável do aerossol, foram devido a variações nas características do minério processado e nas condições de ventilação.

Nas amostras, nas quais foram identificadas ^{232}Th e ^{228}Th , foi observado o equilíbrio radiológico entre estes isótopos, exceto na amostra coletada junto ao forno na etapa de lixiviação.

A amostra coletada junto à porta do restaurante indica que as partículas transportadas pelo ar, neste local, não continham Th na fração respirável do aerossol.

Nesta instalação, como na Instalação A, podemos estimar a concentração de ^{232}Th , na fração respirável, a partir da massa de Th nas amostras de aerossóis coletadas com ICN e a concentração, em massa, determinada pelo método PIXE. Estas concentrações calculadas são apresentadas na Tabela 6.9.

Tabela 6.9 Concentração calculada de ^{232}Th , na fração respirável do aerossol. Amostras coletadas com ICN, na Instalação B.

Etapa	Local	Visita	Amostra	Concentração de ^{232}Th (mBq/m ³)	
Britagem do minério	Britador do tipo mandíbula	1	BICO1	2,3	
		2	BIC11	5,8	
		2	BIC12	1,9	
	Brit. tipo impacto	Pilha de minério	1	BICO2	1,2
			1	BICO3	1,0
			1	BICO4	0,7
			1	BICO5	2,0
Lixiviação	Entamboramento	1	BIC06	0,9	
		1	BIC07	12,5	
Metalurgia	Mistura	1	BIC08	7,7	
		2	BIC13	2,3	
		2	BIC14	2,7	
		1	BIC09	17,1	
	Britagem da liga Fe-Nb		1	BIC10	12,3
			2	BIC15	1,9
			2	BIC16	6,0
Britagem da escória		2	BIC17	7,2	

Brit. tipo impacto = Britador do tipo impacto

A exposição de cada trabalhador, individualmente, à poeira de minério foi avaliada solicitando a um grupo de trabalhadores que usasse amostradores individuais de lapela com corte na fração respirável.

Na Tabela 6.10 são apresentadas as concentrações de ^{232}Th e ^{228}Th , na fração respirável do aerossol. Os trabalhadores usaram os amostradores durante um turno inteiro de trabalho.

Tabela 6.10 Concentração de ^{232}Th e de ^{228}Th na fração respirável do aerossol. Amostras coletadas com amostrador individual de lapela, na Instalação B.

Etapa	Visita	Código do trabalhador	Concentração (mBq/m ³)	
			^{232}Th	^{228}Th
Lavra e transporte	2	BT02	<LD*	<LD**
	2	BT03	2,5	3,3
	2	BT04	<LD	<LD
	2	BT05	<LD	<LD
Britagem	2	BT06	7,0	7,9
	2	BT07	<LD	<LD
	2	BT08	<LD	1,60
Metalurgia	2	BT09	<LD	<LD
	2	BT10	<LD	<LD
	1	BT01	21,8	24,9
	2	BT11	<LD	2,0
	2	BT12	<LD	<LD

*Limite de detecção de ^{232}Th = 0,9 mBq/m³.

**Limite de detecção de ^{228}Th = 1,1 mBq/m³.

Na primeira visita, o trabalhador BT01 operava a ponte rolante, durante o processo de aluminotermia. Ele usou o amostrador durante todo o turno de trabalho. Na segunda visita, o trabalhador BT10 operava a ponte rolante, e também, usou o amostrador durante todo o período do turno. Na operação de ponte rolante, o trabalhador permanecia fixo em um determinado local, exercendo uma única função na etapa do processo. Na etapa de lavra e transporte, os trabalhadores operavam as retro-escavadeiras para extração tanto do minério como de estéreis e participavam do transporte do minério para a etapa de britagem do minério. Os demais trabalhadores

exerciam mais de uma função em cada etapa e circulavam pela área referente a cada etapa do processo.

6.2.3 AMOSTRAS BIOLÓGICAS COLETADAS NA INSTALAÇÃO B

Durante a segunda visita, foi selecionado um grupo de trabalhadores, entre os que trabalhavam nas principais etapas do processo. A este grupo foi solicitado que fornecessem amostras de fezes. Os trabalhadores das etapas de lixiviação e concentração, durante esta visita, auxiliavam em outras etapas, ou na manutenção dos equipamentos nas áreas de lixiviação e concentração. Dos 11 trabalhadores que usaram os amostradores individuais, apenas 6 forneceram amostras de fezes. Além destes, 7 trabalhadores que não usaram amostradores de lapela forneceram amostras de fezes. Dentre estes 7, um era do setor de administração. Deste modo, foram totalizadas 18 amostras de fezes fornecidas pelos trabalhadores.

Na Tabela 6.11 são apresentadas as concentrações de ^{232}Th e ^{228}Th nas amostras de fezes fornecidas pelos trabalhadores.

A razão entre a concentração de ^{228}Th e ^{232}Th variou de 1,2 (BT15) a 30,2 (BT10).

A concentração de ^{232}Th nas amostras variou de 1,8 a 27,9 mBq/g_(de cinza) e a concentração média foi $8,7 \pm 7,0$ mBq/g_(de cinza).

A concentração de ^{228}Th nas amostras variou de 2,3 a 29,9 mBq/g_(de cinza) e a concentração média foi $51,3 \pm 29,9$ mBq/g_(de cinza).

As concentrações médias de ^{232}Th e de ^{228}Th estavam acima da faixa de variação das concentrações do grupo controle. No grupo controle a concentração de ^{232}Th variou entre o limite de detecção e 5,1 mBq/g_(de cinza). Neste grupo a média do valores acima do limite de detecção foi $4,1 \pm 0,9$ e $13,4 \pm 5,3$ mBq/g_(de cinza), para ^{232}Th e ^{228}Th , respectivamente (Tabela 6.17, seção 6.4).

Com a finalidade de comparação com a exposição dos trabalhadores, foi realizado o acompanhamento de um indivíduo, não trabalhador, mas que participou do programa de amostragem. Durante a segunda visita, ele forneceu 1 amostra de fezes. Após o término da visita (30/06), ele forneceu mais 2 amostras, uma no dia 02/07 e outra no dia 03/07. A quarta amostra foi fornecida 6 meses após a visita. As concentrações de ^{232}Th e de ^{228}Th , nestas 4 amostras de fezes, são apresentadas na Tabela 6.12.

Tabela 6.11 Concentração ^{232}Th e ^{228}Th nas amostras de fezes fornecidas pelos trabalhadores. Amostras coletadas na instalação B.

Etapa	Data da coleta	Código do trabalhador	Massa da amostra ¹ (g _(de cinza))	Concentração (mBq/g _(de cinza))		Razão $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$
				^{232}Th	^{228}Th	
Lavra e transporte	29/06	BT02	2,62	1,8	4,3	2,4
	29/06	BT03	1,61	27,9	70,8	2,5
	29/06	BT04	2,45	11,2	42,1	3,8
	29/06	BT05	3,15	15,3	77,6	5,1
Britagem	29/06	BT06	1,82	7,2	47,1	6,5
Metalurgia	29/06	BT10	0,82	3,4	102,7	30,2
	29/06	BT11	0,70	<LD	25,7	-
	29/06	BT18*	2,32	9,5	62,8	6,6
Concentração	29/06	BT13*	2,70	10,8	58,6	5,4
	29/06	BT14*	1,43	6,9	96,0	10,0
	29/06	BT15*	1,78	1,9	2,3	1,2
	29/06	BT16*	2,82	5,5	52,1	9,5
Lixiviação	29/06	BT17*	0,64	9,8	42,6	4,3
Administração	29/06	BT19*	3,92	2,6	33,4	12,8

* Não usaram amostradores de lapela

A variação na concentração de ^{232}Th nas amostras fornecidas por um membro da equipe técnica que participou da coleta de amostras de aerossóis (Tabela 6.12) indica que ele incorporou Th durante a sua permanência na instalação.

1 Massa de uma excreta completa de 24 h, foi solicitada ao trabalhador a excreta completa de um dia inteiro.

Tabela 6.12 Concentração de ^{232}Th e ^{228}Th nas amostras de fezes fornecida por um membro da equipe técnica que participou da coleta de amostras de aerossóis.

Data	Concentração nas fezes (mBq/g _(de fezes))		Razão
	^{232}Th	^{228}Th	$^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$
29/06/95	17,5	30,6	1,7
02/07/95	2,6	15,5	6,0
03/07/95	<LD	15,9	-
04/01/96	<LD	9,6	-

As concentrações de ^{232}Th e de ^{228}Th nas amostras de fezes, fornecidas pelos trabalhadores, indicam que eles estavam incorporando tório. Esta incorporação poderia estar ocorrendo por inalação de partículas finas contendo Th ($< 2,5 \mu\text{m}$), os quais iriam depositar-se no trato respiratório. Outra forma de incorporação, seria a inalação de partículas grossas ($> 2,5 \mu\text{m}$), as quais ao serem inaladas seriam removidas por processos mecânicos, sendo transportadas para o trato gastro-intestinal. Porém, como o tamanho das partículas contendo Th estavam na fração respirável, exceto na britagem da liga Fe-Nb, na primeira visita, esta hipótese foi descartada. Uma terceira forma de incorporação, seria a ingestão direta de partículas contendo tório. Hábitos como levar mão a boca, comer, beber e fumar nas áreas de trabalho poderiam causar a incorporação de Th via ingestão. Além disso, foi observado durante a nossa visita à instalação que partículas se depositavam nos lábios dos membros de nossa equipe.

Na Figura 6.11 é apresentada uma comparação entre as atividades esperadas de Th em excreta, utilizando-se como via de incorporação a inalação e a ingestão, para 1 ano de trabalho, aplicando-se o modelo proposto na publicação número 30 da ICRP (ICRP, 1979; Dantas, 1993).

Considerando que os trabalhadores se contaminaram por ambas as vias de exposição, inalação e ingestão, e utilizando o modelo da publicação número 30 da ICRP (1979), verificamos que após 20 dias de férias, a atividade excretada nas fezes é relacionada apenas à contaminação via inalação (Dantas, 1993).

Como a passagem do trato gastro-intestinal para as fezes é rápida, a concentração de ^{232}Th , nas fezes, devido a incorporação por ingestão diminui muito mais rápido quando comparada com à incorporação via inalação. Assim, para avaliar a contribuição devido, apenas, à inalação de partículas finas, foi solicitado aos trabalhadores que fornecessem novas amostras de fezes. A primeira deveria ser

amostras fornecidas antes das férias ($\alpha=0,05$) (Anexo 2, item 8).

As concentrações de ^{232}Th nas amostras de fezes coletadas após as férias foram comparadas às concentrações de ^{232}Th nas amostras de fezes do grupo controle e as concentrações de ^{232}Th nas amostras de fezes fornecidas pelos trabalhadores durante a segunda visita para coleta de amostras de aerossóis (segunda visita). Em ambas as comparações foi utilizado o teste, não paramétrico, de Mann-Whitney. Concluímos que não existe diferença entre as concentrações de ^{232}Th nas amostras dos trabalhadores após as férias e nas amostras do grupo controle (Anexo 2, item 9). No entanto, quando comparamos as concentrações de ^{232}Th nas amostras de fezes dos trabalhadores após das férias às concentrações nas amostras fornecidas durante a segunda visita, concluímos que as concentrações são diferentes nestes dois grupos (Anexo 2, item 10).

Estes resultados mostram que a principal via de incorporação dos trabalhadores é a ingestão.

Na etapa de lavra e transporte, foram coletadas amostras apenas com os amostradores individuais de lapela. A concentração de ^{232}Th em 3 das 4 amostras coletadas estava abaixo do limite de detecção.

Na etapa de britagem do minério, na segunda visita, na fração respirável, nas amostras coletadas com o ICN, as concentrações de ^{232}Th foram de 1,9 a 5,8 mBq/m^3 . O MMAD da partícula contendo Th variou de 1,1 a 1,6 μm .

Na segunda visita, na etapa de metalurgia, no local de trabalho dos indivíduos que forneceram amostras de fezes, nas amostras coletadas com o ICN as concentrações de ^{232}Th foram 2,3 e 2,7 mBq/m^3 e o MMAD das partículas contendo Th foram 2,1 a 2,3 μm .

As concentrações de ^{232}Th nas amostras de urina dos trabalhadores estavam abaixo da concentração mínima detectável ($0,25 \pm 0,033 \mu\text{g/l}$).

Analisando-se os resultados destas amostras, concluímos que, nesta instalação, a incorporação de tório é via ingestão na área do processo.

Apesar das incertezas e dificuldades associadas à interpretação dos resultados do estudo da caracterização de aerossóis para avaliar a exposição de trabalhadores à poeira de minério, é justificada a importância da utilização desta monitoração na avaliação da exposição de trabalhadores à poeira de minério. As amostras seletivas

por tamanho não são uma medida da deposição no trato respiratório mas da disponibilidade das partículas serem incorporadas nas várias regiões.

7.4 CARACTERIZAÇÃO DA EXPOSIÇÃO DE TRABALHADORES A AEROSSÓIS CONTENDO TÓRIO, NA INSTALAÇÃO C

Nesta instalação além da caracterização do aerossol, também foi avaliada a incorporação de tório pelos trabalhadores.

A principal diferença entre esta instalação e as demais é que nela o tório é usado como matéria-prima, na forma de nitrato de tório.

A caracterização das partículas, na fração respirável do aerossol, nesta instalação, mostrou que os trabalhadores estavam expostos a aerossóis contendo Th, e Pb.

Nesta instalação, o aerossol era gerado por evaporação de soluções contendo Th. O MMAD das partículas contendo Th, na etapa de impregnação foi 0,9 μm , e na etapa de costura, 1,0 μm .

As concentrações de tório na fração respirável do aerossol foram as mais baixas das três instalações estudadas. A concentração de ^{232}Th , na amostra coletada com o ICN, na primeira visita, na etapa de impregnação foi 1,9 mBq/m^3 e na etapa de costura 1,0 mBq/m^3 . Nas 8 amostras coletadas com amostradores individuais de lapela, nas duas visitas, a maior concentração de ^{232}Th , na fração respirável do aerossol, foi 2,1 mBq/m^3 .

As concentrações de ^{232}Th nas amostras de fezes dos trabalhadores variaram de 7,4 a 120,0 $\text{mBq}/\text{g}_{(\text{de cinza})}$. A concentração média foi de $78,7 \pm 37,1 \text{ mBq}/\text{g}_{(\text{de cinza})}$. No cálculo da média foi excluída a amostra fornecida pelo supervisor da área (7,4 $\text{mBq}/\text{g}_{(\text{de cinza})}$). Estas concentrações são maiores que a do grupo controle conforme indicado pela aplicação do teste estatístico, não paramétrico, de Mann-Whitney ($\alpha=0,05$) (Anexo 2, item 11). Estas concentrações, também, foram mais altas que as das amostras fornecidas pelos trabalhadores da instalação **B** (antes das férias).

Comparando as concentrações de ^{232}Th , na fração respirável, com as concentrações deste radionuclídeo nas fezes, concluímos que não existe uma relação entre a concentração no ar de ^{232}Th e a sua concentração nas fezes.

As concentrações de tório nas amostras de fezes fornecidas pelos

trabalhadores estavam em média abaixo dos valores de concentrações encontrados por Julião et al. (Julião et al., 1994), que determinou concentrações de ^{232}Th nas amostras de fezes, dos trabalhadores desta indústria. As concentrações (antes das férias) variaram de 3,7 a 880 $\text{mBq/g}_{(\text{de cinza})}$ e a variação da concentração de ^{232}Th em amostras de fezes de trabalhadores, antes e após as férias, foi de cerca de uma ordem de grandeza.

Os procedimentos de higiene do trabalho, adotados após os estudos realizados por Julião et al. (Julião et al., 1994), podem ter propiciado a redução na concentração de Th nas amostras de fezes fornecidas pelos trabalhadores.

No estudo realizado por Dantas, em 1993, as concentrações de ^{232}Th nas amostras de fezes após as férias estavam acima da faixa de variação do grupo controle indicando que além da incorporação por ingestão também existia incorporação por inalação.

As concentrações de ^{232}Th nas amostras de aerossóis, coletadas na fração respirável (0,5 a 2,5 μm) variaram do limite de detecção até 2,1 mBq/m^3 . Os MMADs das partículas contendo tório foram 0,9 e 1,0 μm . Os resultados de fezes obtidos por Dantas (Dantas, 1993) indicam que nesta instalação existe incorporação de tório pelos trabalhadores, via inalação. Estes resultados não são compatíveis com os baixos resultados de concentração de ^{232}Th na fração respirável do aerossol encontrados. Como os amostradores usados só coletam partículas acima de 0,5 μm , é necessário determinar a concentração de ^{232}Th na fração do aerossol com partículas menores. Contudo, a incorporação por ingestão continua sendo a principal fonte de contaminação nesta instalação, devido ao hábito de beber e comer na área de trabalho.

CONCLUSÕES

8.1 IMPACTADOR EM CASCATA - ICN

- ▼ Foi construído com sucesso um Impactador em Cascata Nacional - ICN que coleta partículas com diâmetro aerodinâmico na faixa de 0,64 a 19,4 μm .
- ▼ O ICN seleciona as partículas respiráveis ($< 2,5 \mu\text{m}$) no quarto estágio e as partículas inaláveis no segundo estágio ($< 10 \mu\text{m}$), comportando-se conforme projetado.
- ▼ O diâmetro de corte do sexto estágio do ICN determinado na calibração experimental (0,64 μm) era igual ao calculado na calibração teórica (0,6435 μm).
- ▼ A intercomparação do ICN com um impactador fabricado comercialmente mostrou que os resultados obtidos com os dois amostradores eram compatíveis. O MMAD determinados utilizando o ICN eram, em média, 10% maiores que os valores determinados com o impactador comercial, mas estas diferenças eram esperadas, pois as frações coletadas em cada um dos estágios dos impactadores eram diferentes.
- ▼ A principal vantagem do ICN, em relação ao impactador comercial ao qual foi comparado, foi coletar partículas na fração inalável no segundo estágio e na fração respirável no quarto estágio. Além dessa, outra vantagem foi o fato das amostras poderem ser analisadas pelo método PIXE, sem prévia modificação da superfície de impactação, reduzindo-se, assim, as incertezas associadas à determinação do tamanho das partículas.

8.2 COMPARAÇÃO DO ICN A OUTROS AMOSTRADORES SELETIVOS DE PARTÍCULAS

- ▼ Comparando os resultados da concentração de ^{232}Th obtidas com o ICN, e com o amostrador do tipo AGF, nas duas instalações, concluiu-se que ambos os amostradores produziram resultados na mesma ordem de grandeza, em termos de concentração geral de ^{232}Th , na fração respirável. Existe uma correlação entre estes resultados, mas não eram iguais.
- ▼ Comparando os resultados da concentração de ^{232}Th obtidas com o ICN, e com o amostrador individual de lapela, nas três instalações, concluiu-se que o ICN não produz resultados que possam ser considerados estatisticamente iguais aos obtidos com os amostradores de lapela. Atribuímos estas diferenças ao fato do ICN estar fixo em um local de coleta e não acompanhar o trabalhador em seus movimentos.
- ▼ O limite de detecção da técnica de amostragem usando o ICN é cerca de 44 vezes menor que usando os amostradores do tipo AGF e individual de lapela e o ICN ainda fornece o tamanho das partículas, um dado essencial para o cálculo da dose e dos limites de exposição dos trabalhadores a aerossóis.

8.3 CARACTERIZAÇÃO DA EXPOSIÇÃO DOS TRABALHADORES NA INSTALAÇÃO A COM BASE EM DADOS PROVENIENTES DE AMOSTRAGEM DE AR

- ▼ Através das medidas realizadas com o ICN, concluímos que:
 - As partículas geradas por processos físicos, contendo os elementos de interesse, eram maiores (diâmetro aerodinâmico equivalente) que $19,4\ \mu\text{m}$. Nesta etapa do processo, a incorporação de partículas contendo Th, via inalação, pelos trabalhadores pode ser desprezível;
 - Nas etapas de beneficiamento úmido do minério os trabalhadores estavam expostos a partículas na fração respirável do aerossol;
 - Nas etapas de britagem do minério bruto e na extração do minério da

cava os trabalhadores estavam expostos às maiores concentrações de partículas contendo Th;

- Além de partículas contendo Th, os trabalhadores estavam expostos à partículas contendo U, Nb, Pb, Y, Zr e Fe;

- Na fração respirável, as maiores concentrações foram de partículas contendo Fe, Nb e Zr;

- As concentrações de partículas contendo Th foram maiores que as concentrações de partículas contendo U;

- O MMAD das partículas contendo Th variou de 1,1 a 1,8 μm , e das contendo U, 1,3 a 1,9 μm ;

- O MMAD das partículas contendo cada um dos elementos de interesse ao longo do tempo.

- ▼ A partir das medidas realizadas com os amostradores AGF de lapela foi observada uma tendência ao desequilíbrio entre o ^{232}Th e ^{228}Th nas amostras de aerossóis coletadas próximas a grandes superfícies de água, ou nos processos de beneficiamento do minério por via úmida. Concluimos que este aparente desequilíbrio nas amostras de aerossóis pode ser devido ao Ra solubilizado na águas dos igarapés, que iria aglutinar-se às partículas de poeira de minério, causando o aparente desequilíbrio.
- ▼ Os dados com os amostradores AGF e ICN, mostraram que os familiares dos trabalhadores não estavam expostos à poeira de minério contendo os elementos de interesse, nas frações respirável e inalável.
- ▼ A maior concentração de ^{232}Th determinada nesta instalação, foi 8,0 mBq/m^3 , obtida com o amostrador do tipo AGF. Este valor é inferior a 25% do valor da concentração no ar derivada, para compostos insolúveis de Th, considerando o AMAD igual a 1 μm (CNEN, 1988).

8.4 CARACTERIZAÇÃO DA EXPOSIÇÃO DOS TRABALHADORES NA INSTALAÇÃO B COM BASE EM DADOS PROVENIENTES DE AMOSTRAGEM DE AR

- ▼ Através das medidas realizadas com o ICN, concluímos que:
 - Além de partículas contendo Th, os trabalhadores estavam expostos à partículas contendo U, Nb, Pb, Y, Zr e Sr;
 - Na fração respirável, as maiores concentrações foram de partículas contendo Nb. A concentração mais alta de partículas contendo Nb foi determinada na etapa de metalurgia;
 - As maiores concentrações de partículas contendo Th foram determinadas durante a britagem do minério, britagem da liga Fe-Nb e britagem da escória;
 - Nas várias etapas do processo os trabalhadores estavam expostos à partículas contendo Pb em concentrações superiores às concentrações de Th;
- ▼ A partir das medidas realizadas com os amostradores AGF e de lapela foi observado, nesta instalação, uma tendência ao equilíbrio entre o ^{232}Th e ^{228}Th , nas amostras de aerossóis coletadas na fração respirável.
- ▼ A maior concentração de ^{232}Th determinada nesta instalação, foi $21,1 \text{ mBq/m}^3$, obtida com o amostrador individual de lapela. Este valor é superior a 50% do valor da concentração no ar derivada, para compostos insolúveis de Th, considerando o AMAD igual a $1 \mu\text{m}$ (CNEN, 1988).

8.5 CARACTERIZAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DE Th PELOS TRABALHADORES NAS INSTALAÇÕES B E C

- ▼ Com o objetivo de estudar indiretamente a incorporação de Th pelos trabalhadores das instalações B e C, foram coletadas amostras de fezes e urina. Para ambas as instalações:
 - Os resultados referentes à análise das concentrações de Th nas amostras de urina dos trabalhadores estavam, todos, abaixo do limite de detecção da técnica ($0,25 \mu\text{g/l}$);
 - As concentrações de Th nas amostras de fezes dos trabalhadores

coletadas durante o período de trabalho foram significativamente maiores do que as concentrações de Th nas amostras de fezes fornecidas pelos indivíduos do grupo controle;

- Não foi observada uma relação entre as concentrações de ^{232}Th , nas amostras de aerossóis coletadas com amostradores de lapela e as concentrações de ^{232}Th nas amostras de fezes fornecidas pelos trabalhadores que usaram estes amostradores. A mesma conclusão se aplica às concentrações de ^{228}Th nestas amostras.

- ▼ Para os trabalhadores da Instalação **B**, foi verificado que após o período de férias, a concentração de Th nas amostras de fezes eram similares as do grupo controle. este resultado caracteriza que a incorporação de Th pelos trabalhadores via inalação não é significativa. A incorporação de Th provavelmente ocorre via ingestão, principalmente, pelo hábito do trabalhador levar a mão a boca, comer e beber nas áreas de trabalho. Uma outra via provável de incorporação, na Instalação **B**, é a exposição a partículas grossas, eliminadas principalmente via sistema gastro-intestinal.

RESUMO DAS CONCLUSÕES

- ▼ Neste trabalho foi desenvolvido um amostrador impactador em cascata nacional, cuja grande vantagem sobre os comercialmente existentes é selecionar as partículas do aerossol na frações respirável e inalável.
- ▼ Nas três instalações os dados obtidos com os amostradores de ar fornecem a indicação de que os trabalhadores de algumas áreas poderiam estar expostos a aerossóis contendo Th, na fração respirável.
- ▼ Os dados obtidos através das amostras de ar e de bioanálise indicam que a incorporação sistêmica de Th não é significativa.
- ▼ Esta coletânea de dados mostra a importância da amostragem seletiva de aerossóis, onde são caracterizados os diâmetros aerodinâmicos das partículas e da necessidade de monitoração simultânea, de área e por bioanálise.

8.6 RECOMENDAÇÕES

- ▼ Desenvolver um amostrador de ar para estimar a concentração de partículas na fração do aerossol com partículas menores que $0,5 \mu\text{m}$.
- ▼ Desenvolver amostradores mais apropriados para os diferentes tipos de ambientes.

MÉTODO PIXE

O método PIXE (*Particle Induced X rays Emission*) é um método de análise não destrutivo, que identifica e quantifica os elementos mais pesados que o sódio (Na, Z=11). Devido às suas características de baixo custo, rapidez nas respostas e baixo limite de detecção, da ordem de nanogramas, ele vem sendo amplamente usado em todo o mundo, na análise de aerossóis (Johansson & Johansson, 1976; Nelson et al., 1977; de Pinho et al., 1979; Kiss et al., 1980; Artaxo & Maenhant, 1991; Artaxo et al., 1992; Flores et al., 1993; Bohgard, 1983; Dias da Cunha et al., 1995).

Este método é adequado para amostra de poeira de minério coletadas com impactador em cascata (Dias da Cunha et al., 1995; Dias da Cunha et al., a publicar).

1.1 ANÁLISE QUANTITATIVA

Quando uma partícula carregada (próton) incide sobre um átomo, existe a probabilidade de que um elétron da camada mais interna seja ejetado de sua órbita, devido à colisão entre a partícula carregada e o átomo da amostra. A vacância criada pela ejeção do elétron deixa o átomo excitado. A desexcitação do átomo ocorre quando um elétron de uma camada ou subcamada superior preenche a vacância. Nesta transição, o elétron libera energia, que pode ser cedida a outro elétron ou emitida na forma de fótons (raios X). A probabilidade da transição ser radioativa é medida pelo coeficiente de rendimento de fluorescência¹ da camada ou subcamada onde ocorre a vacância. No caso da transição não ser radioativa, um segundo elétron pode ser ejetado, resultando em uma transição de Auger ou de Coster-Kröning (Dyson, 1973).

A probabilidade do próton com energia (E) interagir com o átomo da amostra resultando na emissão de raios X característicos depende da seção de choque de

¹O rendimento de fluorescência para cada camada é definido como a razão entre o número de raios X emitidos e o número de vacâncias criadas na camada (Fink et al., 1966).

ionização e do rendimento de fluorescência da camada ou subcamada (FinK et al., 1966).

Os raios X com energia inferior a 1,04 keV, que corresponde à linha K_{α} do sódio (Na, Z=11), são absorvidos na janela do detector semi-condutor Si-Li. A faixa de energia de operação deste detector, no arranjo experimental usado, foi de 1,04 a 30 keV. Deste modo, os elementos cuja energia das linhas K são superiores a 30 keV foram identificados pelas linhas L. Nesta faixa de energia, estão os elementos mais pesados que o estanho (Sn, Z =50).

A massa de cada elemento identificado na amostra foi determinada em relação ao número de raios X característicos detectados (ou simplesmente raios X) (Livro de RX).

O número de raios X característicos (N_x) por elemento de volume depende da seção de choque do elemento para produção de raios X por prótons com energia E, do número de átomos do elemento presente na amostra e do número de prótons que incidem sobre a amostra. Deste modo, N_x é dado por :

$$dN_x = \sigma_x(E) P(x, y) n(x, y, z) dv \quad 1.1$$

onde:

$dv \rightarrow$ elemento de volume;

$n(x,y,z) \rightarrow$ número de átomos do elemento por unidade de volume;

$P(x,y) \rightarrow$ número de prótons por unidade de área do feixe incidente com energia E;

$\sigma_x(E) \rightarrow$ seção de choque do elemento para produção de raios X devido a partículas de energia E.

Uma fração do número total de raios X induzidos na amostra é auto-absorvida, e uma fração dos raios X que deixam a amostra é atenuada pelo meio. A fração atenuada na própria amostra pode ser quantificada considerando-se a espessura da amostra (t) e o coeficiente de atenuação da amostra (μ).

A fração de raios X detectada pelo detector depende da geometria do arranjo experimental. Como a amostra e o detector estão em vácuo (10^{-6} torr), podemos desprezar a atenuação dos raios X pelo meio. Deste modo, o número de raios X é

dado por:

$$dN_x = \sigma_x(E) \times e^{-\mu t} \times \frac{\Omega}{4\pi} \times P(x, y) \times n(x, y, z) dv \quad 1.2$$

A espessura da amostra deve ser fina o bastante de modo que o valor de "t" seja tão pequeno que tenda a zero e o termo $e^{-\mu t}$ tenda a 1. Como a espessura das amostras é desprezível, podemos considerar que as partículas do feixe não perdem energia ao incidir sobre a amostra, sendo constante a seção de choque para cada elemento [$\sigma_x(E_0) = \sigma_x(E)$].

Deste modo, a equação que fornece o número de raios X emitidos pelo elemento de volume da amostra é dado por:

$$dN_x = \frac{\Omega}{4\pi} \times \sigma_x(E_0) \times P(x, y) \times n(x, y, z) dv \quad 1.3$$

Supondo-se um feixe de prótons com densidade homogênea, o número de prótons por seção reta do feixe é dado por:

$$P(x, y) = \frac{P}{S} \quad 1.4$$

onde:

P → número total de partículas do feixe;

S → área do feixe.

Deste modo, o número total de raios X emitidos pela amostra por unidade de volume é dado por:

$$N_x = \frac{\Omega}{4\pi} \times \sigma_x(E_0) \times \frac{P}{S} \int [n(x, y, z) \times dx dy dz] \quad 1.5$$

A equação a seguir representa o número total de átomos da amostra que são irradiados no volume da amostra v :

$$\int n(x, y, z) dx dy dz = N \quad 1.6$$

onde N é o número total de átomos do elemento presente na amostra, que pode ser relacionado à massa do elemento presente na amostra pela equação:

$$N = \frac{M \times 6,02 \times 10^{23}}{A} \quad 1.7$$

onde:

M → massa do elemento presente na amostra;

A → massa atômica do elemento;

$6,02 \times 10^{23}$ → número de Avogadro.

O número de raios X produzidos por um feixe de prótons com energia E_0 e que são detectados é:

$$N_x = \frac{\Omega}{4\pi} \times \varepsilon \times \sigma_x(E_0) \times \frac{Q \times M}{2,66 \times 10^{-9} S \times A} \quad 1.8$$

onde:

$\Omega/4\pi$ → ângulo sólido do detector (esterradianos);

ε → eficiência do detector;

$\sigma_x(E_0)$ → seção de choque do elemento para produção de raios X por prótons com energia E_0 (barn);

Q → carga total que atravessa a amostra (μC);

M → massa do elemento presente na amostra (μg);

S → área do feixe (mm^2);

A → massa atômica do elemento;

$2,66 \times 10^{-9}$ → fator de correção de unidades;

1.2 INCERTEZAS DO MÉTODO

Devido ao baixo limite de detecção do método, deve ser dada especial atenção às condições experimentais durante a análise das amostras, para evitar falsas interpretações dos resultados. Uma das principais fontes de erro neste método é o aquecimento das amostras, provocado pela incidência do feixe muito intenso, que pode causar perda de massa dos elementos por vaporização. Esta fonte de incerteza pode ser eliminada irradiando-se as amostras com feixes de baixa densidade (Montenegro, 1977; Montenegro et al., 1991).

Os detectores desenvolvidos até a presente data, utilizados na rotina de análise por PIXE, muitas vezes não apresentam resolução suficiente para separar os picos correspondentes às linhas dos diferentes espectros gerados em amostras multielementares. Assim, os espectros emitidos por amostras multielementares são formados pela sobreposição de espectros dos diferentes elementos presentes na amostra, que se sobrepõem. Os casos mais freqüentes de sobreposição de picos são as linhas K_{α} do elemento Z com as linhas K_{β} do elemento Z+1, para elementos com baixo número atômico ($20 < Z < 50$). Para elementos com $Z > 50$, a sobreposição ocorre nas linhas L_{α} e L_{β} , no arranjo experimental usado (livro de RX). A dificuldade em resolver estes espectros sobrepostos é uma das causas de incerteza no método PIXE. A análise do espectro multielementar com auxílio de espectros padrões reduz a incerteza na análise das amostras. O espectro padrão é um espectro monoelementar irradiado nas mesmas condições das amostras multielementares. Este espectro padrão é normalizado em relação à linha principal do elemento (K ou L) no espectro multielementar da amostra, sendo determinada a contribuição do elemento no espectro.

Amostra espessa pode ocasionar perda de energia do próton. Ao atravessá-la o feixe perde energia e conseqüentemente haverá variação da seção de choque de ionização, levando a interpretações errôneas da composição elementar da amostra. Além disto, a amostra espessa, também, pode ocasionar a auto-absorção dos raios X característicos emitidos pelos elementos presentes na amostra. Este erro pode ser considerado desprezível caso seja feita a correção para amostras espessas, ou irradiando-se amostras suficientemente finas para que a perda de energia seja considerada desprezível, assim como a auto-absorção (Margulis, 1977).

A homogeneidade do feixe de partículas também deve ser considerada na análise de incertezas associadas ao método PIXE. Um número maior de partículas incidindo sobre uma amostra produzirá um número maior de raios X. Deste modo, o feixe de partículas incidente sobre a amostra deve ser homogêneo, para que a taxa de emissão de raios X, de um dado elemento, dependa apenas do número de átomos deste elemento presente na amostra. A produção de mais de uma vacância em um mesmo átomo e/ou a produção de raios X por elétrons secundários tendem a aumentar o número de raios X emitidos. No entanto, sendo este efeito de segunda ordem, não foi considerado (Barros Leite, 1977; Margulis, 1977).

TESTES ESTATÍSTICOS

- 1 COMPARAÇÃO ENTRE AS CONCENTRAÇÕES DE ^{232}Th NAS AMOSTRAS COLETADAS COM ICN E AGF, NAS INSTALAÇÕES **A** E **B**. TESTE DE WILCOXON.

A comparação entre a concentração ^{232}Th nas amostras coletadas com ICN, e a concentração de ^{232}Th nas amostras coletadas com AGF, nas Instalações **A** e **B**, foi feita utilizando o teste não paramétrico, pareado de Wilcoxon.

Para comparação dos dados obtidos com os dois amostradores foi considerado que o limite de detecção do amostrador AGF era $0,7 \text{ mBq/m}^3$. Portanto, consideramos como compatíveis (matematicamente com diferença nula) os pares de resultados obtidos nos quais o ICN apresentava resultados menores ou iguais a $0,7 \text{ mBq/m}^3$ e o AGF resultados abaixo do limite de detecção.

Onde:

H_0 = não existe diferença entre as duas distribuições.

H_1 = existe diferença entre as duas distribuições.

$\alpha = 0,05$

Na Tabela T1 são apresentadas as concentrações de ^{232}Th nas amostras coletadas com os dois amostradores.

$n = 16$

n' = é o número de pares com diferença não nula.

$n' = 7$

Tabela T1 Concentrações de ^{232}Th nas amostras coletadas com amostradores ICN e AGF, nas Instalações A e B.

Concentração de ^{232}Th nas amostras coletadas com ICN		Concentração de ^{232}Th nas amostras coletadas com AGF	Diferença	Ordem	Ordem com sinal
C	$C_{\text{média}}$	C			
<LD*		<LD	0		
<LD		<LD	0		
<LD		<LD	0		
0,9	0,8	1,8	-1,0	4,5	-4,5
0,6					
0,6		<LD	0		
0,7		<LD	0		
<LD		<LD	0		
2,8		1,8	1,0	4,5	4,5
0,5		<LD	0		
<LD		<LD	0		
<LD		<LD	0		
5,8		5,7	0,1	1	1
1,9		5,5	-3,6	6	-6
12,5	10,1	9,9	0,2	2	2
7,7					
17,1	14,7	10,8	3,9	7	7
12,3					
6,0	6,6	5,6	1,0	3	3
7,2					

m = número de ordens com sinal menos freqüentes.

T^+ = somatório das ordens com sinal menos freqüentes.

$T^+ = 10,5$

$T' = 5,5$

$T_{0,05(2)7} = 2$

Quando T e T' são maiores que T_c a hipótese H_0 é aceita.

Então, a hipótese H_0 foi aceita para um nível de confiança de 0,05.

2 COMPARAÇÃO ENTRE AS CONCENTRAÇÕES DE ^{232}Th NAS AMOSTRAS COLETADAS COM ICN E AGF. TESTE ESTATÍSTICO DE REGRESSÃO LINEAR.

Foi aplicado o procedimento de regressão linear e correlação aos resultados obtidos com os dois amostradores, apresentados na Tabela T1.

A concentração de ^{232}Th determinadas nas amostras coletadas com o ICN foi considerada como variável independente.

Coefficiente linear da reta (a) = 1,8959

Coefficiente angular da reta (b) = 0,6502

$$r^2 = 0,8297$$

$$H_0 : r^2 = 0$$

$$t = 4,9341$$

$$t_{0,05} = 2,571$$

A hipótese de R^2 ser igual a zero foi rejeitada para um nível de confiança de 0,05. Assim, concluímos que existe uma correlação entre as concentrações determinadas com os dois amostradores.

$$H_0 : b = 1$$

$$t = 6,9298$$

Assim, esta hipótese foi rejeitada para um intervalo de confiança de 0,05. Assim, concluímos que as concentrações determinadas com os dois amostradores não são iguais.

3 COMPARAÇÃO ENTRE AS CONCENTRAÇÕES DE ^{232}Th NAS AMOSTRAS COLETADAS COM ICN E AMOSTRADOR INDIVIDUAL DE LAPELA. TESTE ESTATÍSTICO DE REGRESSÃO LINEAR. AMOSTRAS COLETADAS NAS INSTALAÇÕES A E B

Foi aplicado o procedimento de regressão linear e correlação aos resultados obtidos com os dois amostradores, apresentados na Tabela T2.

A concentração de ^{232}Th determinadas nas amostras coletadas com o ICN foi considerada como variável independente.

Coefficiente linear da reta (a) = -2,2120

Coefficiente angular da reta (b) = 2,0348

$$r^2 = 0,80356$$

$$H_0 : r^2 = 0$$

$$t = 6,3816$$

$$t_{0,05} = 2.306$$

Foi rejeitada a hipótese de R^2 ser igual a zero para um nível de confiança de 0,05. Assim, concluímos que existe uma correlação entre as concentrações determinadas com os dois amostradores.

Tabela T2 Concentrações de ^{232}Th nas amostras coletadas com amostradores ICN e amostradores individuais de lapela, nas Instalações A e B.

Concentração de ^{232}Th nas amostras coletadas com ICN		Concentração de ^{232}Th nas amostras coletadas com amostradores de lapela	
C	$C_{\text{média}}$	C	$C_{\text{média}}$
<LD		1,8	
<LD		2,1	
<LD		<LD	
<LD		<LD	
		<LD	
		<LD	
0,3	0,6	2,9	2,5
0,9		2,1	
0,6			
0,6	0,7	2,0	
0,7			
2,4		2,3	
2,8	2,5	<LD	
2,1			
0,5		2,3	
5,8		7,0	
1,9		<LD	
		<LD	
12,5	10,1	21,8	
7,7			
2,3		<LD	
2,7		<LD	

- 4 COMPARAÇÃO ENTRE AS CONCENTRAÇÕES DE ^{232}Th NAS AMOSTRAS COLETADAS COM OS AMOSTRADORES INDIVIDUAIS DE LAPELA E AS CONCENTRAÇÕES DE ^{232}Th NAS AMOSTRAS DE FEZES DOS TRABALHADORES QUE USARAM ESTES AMOSTRADORES. TESTE ESTATÍSTICO DE CORRELAÇÃO DE SPEARMAN.

Foi aplicado o procedimento estatístico de correlação não paramétrica de Spearman às concentrações de ^{232}Th determinadas nas amostras coletadas com amostradores individuais de lapela e nas amostras de fezes fornecidas pelos trabalhadores que usaram estes amostradores.

Tabela T3 Concentrações de ^{232}Th nas amostras coletadas com amostradores individuais de lapela e nas amostras de fezes dos trabalhadores que usaram estes amostradores.

Concentrações nas amostras coletadas com amostradores de lapela	Concentrações nas amostras de fezes dos trabalhadores
<LD	1,8
2,5	27,9
<LD	11,2
<LD	5,3
7,0	7,2
<LD	3,4
0,9	<LD

$$n = 7$$

$$r = 0,0827$$

$$r^2 = 0,00684$$

A hipótese de existir uma correlação entre os resultados obtidos com os dois amostradores foi rejeitada.

5 COMPARAÇÃO ENTRE AS CONCENTRAÇÕES DE ^{228}Th NAS AMOSTRAS COLETADAS COM OS AMOSTRADORES INDIVIDUAIS DE LAPELA E AS CONCENTRAÇÕES DE ^{228}Th NAS AMOSTRAS DE FEZES DOS TRABALHADORES QUE USARAM ESTES AMOSTRADORES. TESTE ESTATÍSTICO DE CORRELAÇÃO DE SPEARMAN.

Foi aplicado o procedimento estatístico de correlação não paramétrica de Spearman às concentrações de ^{232}Th determinadas nas amostras coletadas com amostradores individuais de lapela e nas amostras de fezes fornecidas pelos trabalhadores que usaram estes amostradores.

Tabela T4 Concentrações de ^{228}Th nas amostras coletadas com amostradores individuais de lapela e nas amostras de fezes dos trabalhadores que usaram estes amostradores.

Concentrações nas amostras coletadas com amostradores de lapela	Concentrações nas amostras de fezes dos trabalhadores
<LD	4,3
3,3	70,8
<LD	42,1
<LD	77,6
7,9	47,1
<LD	102,7
2,0	25,7

$$n = 7$$

$$r = 0,05911$$

$$r^2 = 0,0034$$

A hipótese de existir uma correlação entre os dois resultados foi rejeitada.

6 COMPARAÇÃO ENTRE AS CONCENTRAÇÕES DE ^{232}Th NAS AMOSTRAS DE FEZES DOS TRABALHADORES COLETADAS DURANTE A SEGUNDA VISITA E AS CONCENTRAÇÕES DE ^{232}Th NAS AMOSTRAS DO GRUPO CONTROLE.

A comparação entre a concentração ^{232}Th em amostras de fezes de trabalhadores, coletadas durante a segunda visita, na Instalação B, e a concentração de ^{232}Th , nas amostras de fezes do grupo controle, foi feita utilizando o teste não paramétrico de Mann-Whitney.

Onde:

H_0 = não existe diferença entre as duas distribuições.

H_1 = trabalhadores > grupo controle¹.

$\alpha = 0,05$.

Na Tabela T5 são apresentadas as concentrações de ^{232}Th nas amostras fornecidas pelos trabalhadores e pelo grupo controle.

$U = 77,5$

$U' = 20,5$

Para um teste com nível de confiança de 0,05:

$U_{0,05(1) 7,14} = 72$

Se $U \geq U_{0,05(1) 7,14}$ então H_0 é rejeitada.

Então, H_0 foi rejeitada, para um nível de confiança de 0,05.

¹ Concentração de ^{232}Th excretada pelos trabalhadores é maior que a concentração de ^{232}Th em amostras de fezes do grupo controle.

Tabela T5 Comparação entre a concentração de ^{232}Th nas fezes de trabalhadores durante a segunda visita e do grupo controle.

Concentração de ^{232}Th nas amostras do grupo de controle	Ordem	Concentração de ^{232}Th nas amostras dos trabalhadores	Ordem
<LD ²	2,5	1,8	5
4,5	11	27,9	21
<LD	2,5	11,2	19
3,5	10	15,3	20
3,3	8	7,2	15
<LD	2,5	3,4	9
5,1	12	<LD	2,5
		9,5	16
		10,8	18
		6,9	14
		1,9	6
		5,5	13
		9,8	17
		2,6	7
n	7	14	
R	48,5		182,5

² A concentração de ^{232}Th , nas amostras de fezes, menor que o limite de detecção (<LD), nos teste estatísticos utilizados para comparação dos dois grupos de concentração, foram consideradas como igual a zero.

7 COMPARAÇÃO ENTRE AS CONCENTRAÇÕES DE ^{232}Th NAS AMOSTRAS DE FEZES DOS TRABALHADORES COLETADAS ANTES DAS FÉRIAS E AS CONCENTRAÇÕES DE ^{232}Th NAS AMOSTRAS DO GRUPO CONTROLE.

A comparação entre a concentração ^{232}Th em amostras de fezes de trabalhadores, coletadas antes das férias, na Instalação B, e a concentração de ^{232}Th , nas amostras de fezes do grupo controle, foi feita utilizando o teste não paramétrico de Mann-Whitney.

Onde:

H_0 = não existe diferença entre as duas distribuições.

H_1 = trabalhadores > grupo controle³.

$\alpha = 0,05$

Tabela T6 Comparação entre a concentração de ^{232}Th nas fezes de trabalhadores antes das férias e do grupo controle.

Concentração de ^{232}Th nas amostras do grupo de controle	Ordem	Concentração de ^{232}Th nas amostras antes das férias	Ordem
<LD	2,5	30,1	19
4,5	10	2,5	6
<LD	2,5	3,5	8,5
3,5	8,5	2,4	5
3,3	7	12,1	14
<LD	2,5	16,8	16
5,1	12	26,9	18
		14,8	15
		<LD	2,5
		6,2	13
		18,2	17
		59,8	20
		5,0	11
n	7	13	
R	45		165.0

³ Concentração de ^{232}Th excretada pelos trabalhadores é maior que a concentração de ^{232}Th em amostras de fezes do grupo controle.

$$U = 74$$

$$U' = 26$$

Para um teste com nível de confiança de 0,05:

$$U_{0,05(1) 7,13} = 67$$

Se $U \geq U_{0,05(1) 7,13}$, então H_0 é rejeitada.

Assim, H_0 foi rejeitada, para um nível de confiança de 0,05.

8 COMPARAÇÃO ENTRE AS CONCENTRAÇÕES DE ^{232}Th NAS AMOSTRAS DE FEZES DOS TRABALHADORES COLETADAS ANTES E APÓS AS FÉRIAS.

A comparação entre a concentração ^{232}Th em amostras de fezes de trabalhadores, coletadas antes as férias, e a concentração de ^{232}Th nas amostras de trabalhadores após as férias, na Instalação B, foi feita utilizando o teste não paramétrico, pareado, de Wilcoxon.

Onde:

H_0 = não existe diferença entre as duas distribuições.

H_1 = existe diferença entre as duas distribuições.

$\alpha = 0,05$

Tabela T7 Comparação entre as concentrações de ^{232}Th , determinadas nas amostras de fezes coletadas antes e após as férias.

Concentração de ^{232}Th nas amostras antes das férias	Concentração de ^{232}Th nas amostras após as férias	Diferença	Ordem	Ordem com sinal
30,1	2,7	27,4	11	11
2,5	<LD	1,5	4	4
3,5	2,9	0,6	1	1
2,4	1,6	0,8	2	2
12,1	1,9	10,2	6	6
16,8	3,6	13,2	7	7
26,9	2,7	24,2	10	10
14,8	1,5	13,3	8	8
<LD	<LD	0	-	-
6,2	5,3	0,9	3	3
18,2	4,6	13,6	9	9
59,8	6,6	53,2	12	12
5,0	2,3	2,7	5	5

$n = 13$

$n' = 12$

n' é o número de pares cuja diferença é diferente de zero.

$\sum T^+ = 78$

Quando todos os valores da diferença são positivos, o valor de T(crítico) fornece a probabilidade da hipótese H_0 ser aceita.

A probabilidade que as duas amostras não sejam diferentes é 0,0002. Então rejeita-se H_0 para um nível de confiança de 0,05.

9 COMPARAÇÃO ENTRE AS CONCENTRAÇÕES DE ^{232}Th NAS AMOSTRAS DE FEZES DOS TRABALHADORES COLETADAS APÓS AS FÉRIAS E AS CONCENTRAÇÕES DE ^{232}Th NAS AMOSTRAS DO GRUPO CONTROLE.

A comparação entre a concentração ^{232}Th em amostras de fezes de trabalhadores, coletadas após as férias, na Instalação B, e a concentração de ^{232}Th , nas amostras de fezes do grupo controle, foi feita utilizando o teste não paramétrico de Mann-Whitney.

Onde:

H_0 = não existe diferença entre as duas distribuições.

H_1 = existe diferença entre as duas distribuições.

$\alpha = 0,05$

Tabela T5 Comparação entre a concentração de ^{232}Th nas fezes de trabalhadores após das férias e do grupo controle.

Concentração de ^{232}Th nas amostras do grupo controle	Ordem	Concentração de ^{232}Th nas amostras após as férias	Ordem
<LD	3	2,7	10
4,5	16	<LD	3
<LD	3	2,9	12
3,5	14	1,6	7
3,3	13	1,9	8
<LD	3	3,6	15
5,1	18	2,7	11
		1,5	6
		<LD	3
		5,3	19
		4,6	17
		6,6	20
		2,3	9
n	7	13	
R	70		140

$$U = 49$$

$$U' = 42$$

Para um teste bicaudal com nível de confiança de 0,05:

$$U_{0,05(2)7,13} = 71$$

Se $U \geq U_{0,05(2)7,13}$, então H_0 é rejeitada.

Então, H_0 foi aceita, para um nível de confiança de 0,05.

10 COMPARAÇÃO ENTRE AS CONCENTRAÇÕES DE ^{232}Th NAS AMOSTRAS DE FEZES DOS TRABALHADORES COLETADAS DURANTE A SEGUNDA VISITA E AS CONCENTRAÇÕES DE ^{232}Th NAS AMOSTRAS DOS TRABALHADORES FORNECIDAS ANTES DAS FÉRIAS.

A comparação entre a concentração ^{232}Th em amostras de fezes de trabalhadores, coletadas durante a segunda visita, e a concentração de ^{232}Th , nas amostras de fezes de trabalhadores, coletadas antes das férias, na Instalação B, foi feita utilizando o teste não paramétrico de Mann-Whitney.

Onde:

H_0 = não existe diferença entre as duas distribuições.

H_1 = existe diferença entre as duas distribuições.

$\alpha = 0,05$

Tabela T6 Comparação entre a concentração de ^{232}Th nas fezes de trabalhadores durante a segunda visita e antes das férias.

Concentrações de ^{232}Th nas amostras na segunda visita	Ordem	Concentração de ^{232}Th nas amostras antes das férias	Ordem
1,8	6	2,7	11
27,9	27	<LD	2
11,2	25	2,9	13
15,3	26	1,6	5
7,2	21	1,9	7,5
3,4	14	3,6	15
<LD	2	2,7	12
9,5	22	1,5	4
10,8	24	<LD	2
6,9	20	5,3	17
1,9	7,5	4,6	16
5,5	18	6,6	19
9,8	23	2,3	9
2,6	10		
n	14	13	
R	245,5		132,5

$$U = 140,5$$

$$U' = 41,5$$

Para um teste bicaudal com nível de confiança de 0,05:

$$U_{0,05(2)13,14} = 132$$

Se $U \geq U_{0,05(2)13,14}$, então H_0 é rejeitada.

Então, H_0 foi aceita, para um nível de confiança de 0,05.

11 COMPARAÇÃO ENTRE AS CONCENTRAÇÕES DE ^{232}Th NAS AMOSTRAS DE FEZES DOS TRABALHADORES, NA INSTALAÇÃO C, E AS CONCENTRAÇÕES DE ^{232}Th NAS AMOSTRAS DO GRUPO CONTROLE.

A comparação entre a concentração ^{232}Th em amostras de fezes de trabalhadores, na Instalação C, e a concentração de ^{232}Th nas amostras de fezes do grupo controle, foi feita utilizando o teste não paramétrico de Mann-Whitney.

Onde:

H_0 = não existe diferença entre as duas distribuições.

H_1 = trabalhadores > grupo controle⁴.

$\alpha = 0,05$

Tabela T7 Comparação entre a concentração de ^{232}Th nas fezes de trabalhadores e nas fezes do grupo controle.

Concentração de ^{232}Th nas amostras do grupo controle	Ordem	Concentração de ^{232}Th nas amostras dos trabalhadores	Ordem
<LD	2	55,5	11
4,5	6	85,4	12
<LD	2	120,0	15
3,5	5	29,7	9
3,3	4	102,4	13
<LD	2	118,9	14
5,1	7	36,4	10
		7,4	8
n	7	8	
R	28		92

$U = n \cdot 52$

$U' = 4$

⁴ Concentração de ^{232}Th excretada pelos trabalhadores é maior que a concentração de ^{232}Th em amostras de fezes do grupo controle.

Para um teste monocaudal com nível de confiança de 0,05:

$$U_{0,05(1)7,8} = 43$$

Se $U \geq U_{0,05(2)7,8}$, então H_0 é rejeitada.

Então, a hipótese H_0 é rejeitada, para um nível de confiança de 0,05.

APÊNDICE A

CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE AEROSSÓIS COLETADAS NA INSTALAÇÃO A

As amostras foram coletadas durante duas visitas feitas à instalação A. Ambas as visitas foram realizadas no período de seca da região. O intervalo entre a primeira visita e a segunda foi de 1 ano.

1 PRIMEIRA VISITA À INSTALAÇÃO A

1.1 IMPACTADOR EM CASCATA

Na primeira visita, foram coletadas 15 amostras com o impactador em cascata, sendo 2 no laboratório de controle de qualidade, 5 na UBM-1, 4 na UBM-3, 2 na PF e 2 na vila de residência.

Na usina de extração do minério do leito do igarapé (PF), o impactador em cascata foi colocado no andar superior, na pré-concentração, junto aos separadores hidrogravimétricos, e no interior do escritório de administração, junto à janela (AIC01 e AIC02).

No Morro do Primário, o único local com energia elétrica era junto ao *Ponto de controle* dos caminhões de transporte do minério, da cava para a usina pré-concentradora. Os amostradores foram colocados afastados cerca de 7 m da cabine do controlador, por questão de segurança dos equipamentos. Periodicamente, passava pela estrada um caminhão-pipa molhando a mesma. Este procedimento era feito para reduzir a geração de poeira devido ao tráfego de caminhões.

Na UBM-1, foram coletadas 4 amostras de poeira de minério com o impactador em cascata. Duas junto ao silo, durante ensacamento do concentrado, (AIC05 e AIC07), uma junto à esteira transportadora de minério seco (AIC04), e uma na etapa de concentração hidrogravimétrica, junto à mesa de jigagem do minério (AIC06).

Na UBM-3, as amostras de poeira de minério foram coletadas na etapa de concentração hidrogravimétrica (AIC08), junto aos elevadores de caneca (AIC09),

junto aos separadores eletromagnéticos (AIC10) e junto ao silo de ensacamento do niobato-tantalato (AIC11).

No Laboratório de controle de qualidade do minério, as amostras foram coletadas junto ao quarteamento do minério e junto às peneiras de separação granulométrica do minério (AIC12 e AIC13).

Na vila residencial, as amostras foram coletadas no interior da casa e na varanda (AIC14, AIC15). A residência escolhida, que localiza-se na principal rua da vila e estava desabitada.

Na Tabela A.1 são apresentados o volume amostrado e o período de cada amostra coletada com o impactador em cascata.

Tabela A.1 Condições de coleta de amostras com o impactador em cascata. Amostras coletadas na Instalação A, durante a primeira visita.

Etapa	Código	Início		Fim		Volume (m ³)
		Data	Hora	Data	Hora	
Usina de extração do minério do leito do igarapé-PF	AIC01	14/09	11:07	14/09	14:12	2,312
	AIC0 2	14/09	18:50	14/09	23:00	3,175
Ponto de controle	AIC03	13/09	09:05	13/09	11:24	1,732
UBM-1	AIC04	10/09	15:55	10/09	20:45	3,612
	AIC05	11/09	09:00	11/09	12:50	2,875
	AIC06	13/09	17:07	13/09	22:43	4,200
	AIC07	12/09	20:04	12/09	24:43	3,487
UBM-3	AIC08	15/09	10:10	12/09	12:52	2,024
	AIC09	15/09	14:06	15/09	16:46	2,125
	AIC10	11/09	19:37	12/09	24:05	3,350
	AIC11	12/09	08:00	12/09	12:00	3,006
Lab. de controle de qualidade do minério do minério	AIC12	09/09	15:45	09/09	17:35	1,375
	AIC13	10/09	09:10	10/09	11:32	1,825
Vila residencial	AIC14	16/09	08:30	16/09	12:45	1,688
	AIC15	16/09	15:53	16/09	18:04	1,634

1.2 AMOSTRADORES AGF

Os amostradores do tipo AGF foram usados para coletar amostras de aerossóis na usina de extração do minério do leito do igarapé (PF), no Morro do Primário, na UBM-1, na UBM-3, no laboratório de controle de qualidade e na vila residencial.

Na usina de extração do minério do leito do igarapé (PF), o amostrador do tipo AGF e o impactador em cascata foram colocados nos mesmos pontos de coleta de amostras, durante o mesmo período. Nas duas coletas de amostra (AAGF01 e AAGF02), o amostrador AGF foi posicionado distando 1 m do impactador em cascata.

No Morro do Primário, o AGF foi colocado junto à janela do controlador de fluxo de caminhão (amostra AAGF03).

Na UBM-1, as amostras foram coletadas junto ao silo, durante o ensacamento do concentrado (AAGF04) e na etapa de concentração hidrogravimétrica, junto às mesas de jigagem (AAGF05).

Na UBM-3, foram coletadas 3 amostras, a primeira na etapa de concentração hidrogravimétrica (AAGF06), a segunda junto aos sacolões contendo o concentrado de niobato-tantalato (AAGF07) e a terceira durante a separação magnética dos mistos para obtenção do concentrado de niobato-tantalato (AAGF08).

As amostras coletadas no laboratório de controle de qualidade do minério foram coletadas junto ao quarteamento da amostra de minério e junto às peneiras de separação granulométrica do minério (AAGF09 e AAGF10).

Os amostradores AGF também foram usados para coletar amostras na casa da vila residencial. Foi colocado na varanda da casa (AAGF11).

O volume amostrado e a duração de cada uma das coletas de amostra, usando amostradores do tipo AGF, são apresentados na Tabela A.2.

Tabela A.2 Condições de coleta de amostras com amostrador AGF. Amostras coletadas na Instalação A, durante a primeira visita.

Etapa	Código	Início		Fim		Volume (m ³)
		Data	Hora	Data	Hora	
Usina de extração do minério do leito do Igarapé-PF	AAGF01	14/09	18:42	15/09	21:44	3,064
	AAGF02	14/09	11:00	14/09	15:00	3,952
Morro do Primário	AAGF03	13/09	09:05	14/09	10:24	1,343
UBM-1	AAGF04	11/09	09:43	11/09	11:10	1,451
	AAGF05	10/09	16:15	10/09	17:51	1,635
UBM-3	AAGF06	11/09	16:15	11/09	18:00	1,785
	AAGF07	12/09	17:05	12/09	18:10	1,069
	AAGF08	15/09	14:09	15/09	16:10	2,037
Lab. de controle de qualidade do minério	AAGF09	9/09	14:24	09/09	15:32	1,155
	AAGF10	10/09	09:24	10/09	10:20	0,952
Vila residencial	AAGF11	16/09	11:43	16/09	16:15	4,569

1.3 AMOSTRADORES INDIVIDUAIS DE LAPELA

Os amostradores individuais de lapela foram usados por 13 trabalhadores que aceitaram colaborar com o nosso projeto. Eles trabalhavam nas áreas nas quais foram coletadas amostras com o ICN e o AGF. A relação destes 13 trabalhadores que usaram os amostradores individuais de lapela e o período de uso durante a primeira visita, são apresentados na Tabela A.3.

Tabela A.3 Condições de coleta de amostras com os amostradores individuais de lapela. Amostras coletadas na Instalação A, durante a primeira visita.

Etapa	Código da amostra	Início		Fim		Volume (m ³)
		Data	Hora	Data	Hora	
Laboratório de controle de qualidade do minério	AL01	09/09	14:30	09/09	17:40	0,475
	AL02	09/09	15:10	09/09	16:50	0,250
	AL03	10/09	09:30	10/09	11:20	0,960
		10/09	12:08	10/09	16:42	
	AL04	10/09	09:10	10/09	11:10	1,040
		10/09	11:46	10/09	16:42	
UBM-1	AL05	11/09	12:12	11/09	23:55	1,757
	AL06	11/09	12:14	11/09	23:53	1,746
UBM-3	AL07	12/09	16:05	12/09	23:15	1,100
	AL08	12/09	16:05	12/09	23:15	1,075
Usina de extração do minério do leito do Igarapé-PF	AL09	14/09	12:10	14/09	23:00	1,625
	AL10	14/09	12:20	14/09	23:00	1,600
Morro do Primário	AL11	13/09	15:20	13/09	22:24	1,060
	AL12	16/09	09:27	16/09	15:50	0,958
	AL13	13/09	15:30	13/09	22:24	1,035
Britador manual	AL14	16/09	09:52	16/09	17:58	1,215

2 SEGUNDA VISITA À INSTALAÇÃO A

2.1 IMPACTADOR EM CASCATA

Na segunda visita, as amostras de poeira de minério foram coletadas junto ao silo, durante o ensacamento do concentrado, na UBM-1 (AIC16 e AIC17) e na UBM-3 (AIC18); e na vila (AIC19). Nesta visita, foi escolhida outra residência para a coleta de amostra de aerossol. O processo de separação eletromagnética dos mistos na UBM-3 não ocorreu, assim como não foram encontrados sacolões de concentrado de minério estocados no pátio.

O volume amostrado e a duração de cada uma das coletas de amostra, usando o ICN, são apresentados na Tabela A.4.

Tabela A.4 Condições de coleta de amostras com impactador em cascata. Amostras coletadas na Instalação A, durante a segunda visita.

Etapa	Código	Início		Fim		Volume [m ³]
		Data	Hora	Data	Hora	
UBM-1	AIC16	28/09	10:56	28/09	14:03	2,405
	AIC17	01/10	13:04	01/10	16:05	2,240
UBM-3	AIC18	29/09	15:53	28/09	19:00	2,331
Vila residencial	AIC19	30/09	08:59	30/09	16:02	5,359

2.2 AMOSTRADORES AGF

Na UBM-1, as amostras de aerossóis foram coletadas com amostradores AGF junto ao silo, durante o ensacamento do concentrado, (AAGF12 e AAGF13) e junto à esteira transportadora concentrado de minério para o silo (AAGF14, AAGF15 e AAGF16). Na UBM-3, as amostras de partículas foram coletadas junto ao forno de secagem do minério (AAGF17) e junto à esteira que transportava o concentrado para o silo (AAGF18).

A data e o volume de cada coleta de amostra de aerossóis com o amostradores AGF são apresentados na Tabela A.5 do Apêndice A.

Tabela A.5 Condições da coleta de amostras com AGF na Instalação A, durante a segunda visita.

Etapa	Código	Início		Fim		Volume (m ³)
		Data	Hora	Data	Hora	
UBM-1	AAGF12	28/09	08:12	28/09	10:06	1,978
	AAGF13	28/09	18:19	29/10	20:34	2,290
	AAGF14	28/09	13:02	28/09	14:33	1,334
	AAGF15	28/09	14:05	28/09	15:20	1,291
	AAGF16	01/10	13:38	01/10	14:52	1,255
UBM-3	AAGF17	29/09	11:22	29/09	12:50	1,571
	AAGF18	29/09	17:59	29/09	19:43	1,762

2.3 AMOSTRADORES DE LAPELA

Por ocasião da segunda visita, só dispúnhamos de 1 amostrador individual de lapela, que foi usado pelo supervisor de turno da UBM-1 (no período das 12:35 às 16:10 h do dia 01/10) (AL15) e pelo supervisor de turno da UBM-3 (no período das 12:00 às 19:40 h do dia 29/09) (AL16). A data e volume de cada uma das amostras são apresentados na Tabela A.6.

Tabela A.6 Condições da coleta de amostras com amostradores individuais de lapela na Instalação A, durante a segunda visita.

Etapa	Código do trabalhador	Início		Fim		Volume (m ³)
		Data	Hora	Data	Hora	
UBM-1	AL15	01/10	12:35	01/10	16:10	0,573
UBM-3	AL16	29/09	12:00	29/09	19:40	1,150

APÊNDICE B

CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE AEROSSÓIS COLETADAS NA INSTALAÇÃO B

Foram realizadas duas visitas à Instalação B, ambas no período de seca na região, com intervalo de, aproximadamente, 1 ano entre elas.

1 - PRIMEIRA VISITA À INSTALAÇÃO B

1.1 Impactador em cascata

Durante a primeira visita, as amostras de aerossóis foram coletadas na etapa de britagem (amostras BIC01, BIC02, BIC03 e BIC04), sendo a amostra BIC01 coletada junto ao britador de mandíbulas, a amostra BIC02 junto ao britador de impacto. Ambas foram coletadas no mesmo dia, com intervalo de 1:30 h entre elas.

As amostras BIC03 e BIC04 foram coletadas junto à pilha de homogeneização de minério. O intervalo entre elas foi 1 h. Na etapa de lixiviação, foram coletadas amostras com impactador em cascata junto ao silo de entamboramento do concentrado, com intervalo de 40 min entre elas (BIC05 e BIC06), no mesmo ponto de coleta. Na etapa da produção da liga, foram coletadas quatro amostras com o impactador. As amostras BIC07 e BIC08 foram coletadas junto ao cadinho de homogeneização da mistura para produção da liga Fe-Nb por processo aluminotermico (ou simplesmente mistura).

Durante a britagem da liga Fe-Nb o amostrador foi colocado junto ao silo que alimentava o tambor com a liga já britada. A amostra BIC09 foi coletada no final da operação de britagem da liga Fe-Nb, e a amostra BIC10 no início deste processo no dia seguinte.

Os períodos e locais de cada coleta de amostra com o impactador, realizadas durante a primeira visita, são apresentados na Tabela B.1.

Tabela B.1 Condições de coleta de amostras com impactador em cascata. Amostras coletadas na Instalação B durante a primeira visita.

Etapa	Código	Início		Fim		Volume (m ³)
		Data	Hora	Data	Hora	
Britagem	BIC01	23/09	10:14	23/09	11:15	0,738
	BIC02	23/09	13:06	23/09	14:12	0,813
	BIC03	24/09	08:29	24/09	09:56	1,087
	BIC04	24/09	11:35	24/09	12:43	0,838
Lixiviação	BIC05	24/09	13:40	24/09	15:00	1,006
	BIC06	24/09	15:40	24/09	16:20	0,462
Metalurgia	BIC07	23/09	00:17	23/09	01:47	1,125
	BIC08	23/09	02:50	23/09	03:47	0,716
	BIC09	22/09	20:04	22/09	21:09	0,813
	BIC10	22/09	22:03	22/09	23:13	0,875

1.2 Amostradores AGF

Na primeira visita, foram coletadas amostras com os amostradores AGF nas etapas de britagem, lixiviação e metalurgia, e junto à entrada do restaurante da mineradora.

A pilha de homogeneização é estocada a céu aberto, distando cerca de aproximadamente 10 m dos setores administrativos. A amostra BAGF01 foi coletada junto à pilha de homogeneização do minério.

A amostra BAGF02 foi coletada na etapa de lixiviação, junto ao forno de calcinação. A amostra coletada na etapa de metalurgia foi coletada junto ao cadinho de homogeneização da mistura para produção da liga Fe-Nb (mistura) (BAGF03), distando 3 m do ponto de coleta das amostras com impactador. A amostra BAGF04 foi coletada na etapa de metalurgia, durante a britagem da liga Fe-Nb. A amostra BAGF05 foi coletada junto à porta de entrada do restaurante da mineradora.

O volume amostrado e a duração de cada coleta de amostra são apresentados na Tabela B.2.

Tabela B.2 Condições de coleta de amostras com amostrador AGF. Amostras coletadas na Instalação B durante a segunda visita.

Etapa	Código	Início		Fim		Volume (m ³)
		Data	Hora	Data	Hora	
Britagem	BAGF01	23/09	10:14	23/09	12:01	1,330
Lixiviação	BAGF02	24/09	14:20	24/09	15:54	1,504
Metalurgia	BAGF03	23/09	00:11	22/09	01:47	1,923
	BAGF04	22/09	20:56	02/10	22:26	1,485
Restaurante	BAGF05	23/09	15:02	23/09	22:14	7,132

1.3 AMOSTRADORES INDIVIDUAIS DE LAPELA

Por ocasião da primeira visita, se dispunha de apenas um amostrador de lapela. O mesmo foi usado pelo trabalhador que operava a ponte rolante, que transportava a mistura, na etapa de metalurgia, durante toda a operação (das 24:00 às 4:35 h). A vazão do amostrador foi 2,5 l/min e o volume amostrado 0,69 m³.

2 SEGUNDA VISITA À INSTALAÇÃO B

2.1 IMPACTADOR EM CASCATA

Na segunda visita, as etapas de concentração e lixiviação do minério não foram realizadas.

O impactador em cascata foi usado para coletar amostras de partículas transportados pelo ar nas etapas de britagem e metalurgia. As amostras coletadas na etapa de britagem, junto ao britador do tipo mandíbulas, (BIC11 e BIC12) foram coletadas em dias diferentes, sendo que a amostra BIC11 foi coletada à noite.

Na etapa de metalurgia, as amostras BIC13 e BIC14 foram coletadas durante a mistura para o processo de produção da liga por aluminotermia. Durante a britagem da liga Fe-Nb, o impactador foi colocado junto ao silo de alimentação do tambor (BIC15). Por ocasião desta visita, a escória era britada para recuperação da liga Fe-Nb. As amostras (BIC16 e BIC17) foram coletadas enquanto a escória era britada úmida, sendo a primeira coletada 30 minutos após o início da britagem úmida.

O volume amostrado e o período de cada uma das amostra são apresentados na Tabela B.3.

Tabela B.3 Condições de coleta de amostras com impactador em cascata. Amostras coletadas na Instalação B, durante a segunda visita.

Etapa	Código	Início		Fim		Volume [m ³]
		Data	Hora	Data	Hora	
Britagem	BIC11	28/06	10:20	28/06	12:50	1,878
	BIC12	28/06	14:25	28/06	16:50	1,742
Metalurgia	BIC13	29/06	00:55	29/06	02:50	1,337
	BIC14	29/06	03:33	29/06	05:30	1,463
	BIC15	28/06	21:45	28/06	23:05	0,996
Britagem da escória	BIC16	29/06	15:00	29/06	15:50	0,620
	BIC17	29/06	16:00	30/06	17:05	0,813

2.2 AMOSTRADORES AGF

Durante esta visita, foram coletadas 2 amostras nas etapas de britagem e 4 na etapa de metalurgia. Na etapa de britagem, o amostrador foi colocado junto ao britador do tipo mandíbulas (BAGF06 e BAGF07). Na etapa de metalurgia, todas as amostras foram coletadas durante a britagem da escória para recuperação da liga. A escória foi britada seca durante a manutenção e teste do britador. Após uma hora, foi britada úmida, como é feita de rotina. A amostra BAGF08 foi coletada 40 min após o término da britagem da escória seca.

O período de coleta e o volume de cada uma das amostras são apresentados na Tabela B.4.

Tabela B.4 Condições da coleta de amostras com AGF na Instalação B, durante a segunda visita.

Etapa	Código	Início		Fim		Volume (m ³)
		Data	Hora	Data	Hora	
Britagem	BAGF06	28/06	09:20	28/06	11:50	3,235
	BAGF07	28/06	16:25	28/06	22:45	5,348
Metalurgia	BAGF08	29/06	15:10	29/06	16:50	1,660
	BAGF09	29/06	17:40	29/06	19:10	1,525
	BAGF10	29/06	19:30	29/06	21:00	1,536
	BAGF11	29/06	22:00	30/06	23:26	1,461

2.3 AMOSTRADORES DE LAPELA

Os trabalhadores que controlam os britadores (da etapa de britagem) e o britador da escória, não ficam fixos na área. Eles circulam, e também, participam das outras atividades que estão ocorrendo durante o seu turno. Os trabalhadores das etapas de concentração e de lixiviação circulam em toda a área. Deste modo, para avaliar a real incorporação dos trabalhadores, 11 trabalhadores que se dispuseram a colaborar com o nosso projeto usaram amostradores de lapela. Eles foram usados pelos trabalhadores durante toda a sua atividade de rotina na mineradora. A estes, foram solicitadas amostras de fezes.

A relação dos trabalhadores e o período de uso dos amostradores individuais são apresentados na Tabela B.5.

Tabela B.5 Condições da coleta de amostras com amostradores individuais de lapela na Instalação B, durante a segunda visita.

Etapa	Código do trabalhador	Início		Fim		Volume (m ³)
		Data	Hora	Data	Hora	
Lavra e transporte	BT01	28/06	14:20	28/06	24:00	1,59
	BT02	28/06	14:20	28/06	23:50	1,43
	BT03	28/06	14:25	28/06	23:55	1,43
	BT03	28/06	14:25	28/06	23:55	1,43
Britagem	BT04	28/06	16:30	28/06	23:55	1,22
	BT05	28/06	13:05	28/06	17:50	0,47
	BT06	29/06	17:30	30/06	23:45	0,94
Metalurgia	BT07	29/06	00:25	29/06	07:55	1,13
	BT08	29/06	00:25	29/06	07:55	1,13
	BT09	29/06	00:30	29/06	07:50	1,21
	BT10	29/06	11:50	29/06	17:50	1,09

APÊNDICE C

CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE AEROSSÓIS COLETADAS NA INSTALAÇÃO C

Foram realizadas duas visitas a esta instalação, com 7 meses de intervalo entre elas. Devido às baixas concentrações de aerossóis (Dias da Cunha et al., 1994), o tempo de coleta de cada amostra de aerossóis, nas duas visitas, correspondeu ao período total de cada visita.

1 PRIMEIRA VISITA À INSTALAÇÃO C

Durante esta visita, o setor de impregnação funcionou apenas durante 2 dias.

1.1 IMPACTADOR EM CASCATA

Nesta visita, foram coletadas 2 amostras com o impactador em cascata, uma no setor de costura das camisas, junto a uma das máquinas de costura (CIC01), e outra no setor de impregnação, na bancada de impregnação, em frente às estufas (CIC02). Na Tabela C.1 são apresentados os períodos de coleta de amostras e o volume de ar amostrado com o ICN.

Tabela C.1 Condições de coleta de amostras com o impactador em cascata. Amostras coletadas na Instalação C, na primeira visita.

Local	Data	Início	Fim	Volume (m ³)
Costura	26/02	11:05	15:35	
	27/02	07:38	09:00	
	27/02	09:15	16:45	
	28/02	09:16	09:30	10,20
Impregnação	26/02	11:05	15:35	
	27/02	08:05	09:00	
	27/02	09:15	09:30	
	27/02	11:47	16:47	
	28/02	09:20	09:30	08,13

1.2 AMOSTRADORES INDIVIDUAIS DE LAPELA

Foi solicitado aos trabalhadores de cada setor que usassem os amostradores individuais de lapela durante suas atividades de rotina. Cada amostrador foi usado sem troca de filtro, sempre pelo mesmo trabalhador, durante suas atividades diárias, na instalação. Os amostradores eram desligados ao término de cada jornada de trabalho e religados no dia seguinte. Os amostradores foram desligados, também, durante os intervalos de almoço e lanche.

Foram coletadas 4 amostras de aerossóis com os amostradores individuais de lapela sendo, 1 no setor de impregnação (CL01) e 3 no setor de costura (CLO2, CL03 e CL04) .

Na Tabela C.2 são apresentados o período de coleta de cada amostra e o volume de ar amostrado com os amostradores individuais de lapela.

Foi solicitado a 8 trabalhadores amostras de fezes, para avaliar a incorporação de tório.

Tabela C.2 Caracterização da coleta de amostras de aerossóis com amostradores individuais de lapela. Amostras coletadas na Instalação C.

Local	Código	Data	Início	Fim	Volume (m ³)
Impregnação	CLO1	27/02	08:10	09:00	1,99
			09:15	11:00	
			11:35	16:45	
		28/02	09:20	11:00	
			12:00	15:00	
			15:20	16:10	
Costura	CLO2	26/02	10:47	12:04	3,61
			11:08	15:30	
		27/02	07:25	09:00	
			09:15	11:02	
			11:40	16:45	
		28/02	09:15	11:00	
			11:58	15:00	
			15:20	16:21	
		29/02	08:35	09:00	
			09:15	11:00	
			11:55	13:55	
		Costura	CLO3	26/02	
11:00	15:38				
27/02	07:35			09:00	
	09:15			11:01	
	11:35			16:45	
28/02	09:15			11:00	
	11:58			15:00	
	15:20			16:20	
29/02	08:30			09:00	
	09:15			11:00	
	11:55			13:55	
Costura	CLO4			26/02	10:43
		12:03	15:30		
		27/02	07:30	09:00	
			09:15	11:00	
			11:39	16:45	
		28/02	09:15	11:00	
			11:58	15:00	
			15:20	16:20	

2 SEGUNDA VISITA À INSTALAÇÃO C

Como não houve modificações no processo, foi adotado o mesmo tamanho para as partículas. Portanto, não foram coletadas amostras com o impactador em cascata. O procedimento adotado para coleta de amostras com os amostradores individuais de lapela foi o mesmo utilizado na primeira visita.

Como o lanche, nesta visita, havia passado a ser feito dentro da área de trabalho, os amostradores não foram desligados durante o lanche.

Foram coletadas 4 amostras no setor de impregnação (CL05, CL06 e CL07) e uma no setor de costura (CL08).

Tabela C.3 Caracterização da coleta de amostras de aerossóis com amostradores individuais de lapela, na segunda visita.

Local	Código	Data	Início	Fim	Volume (m ³)
Impregnação	CL05	11/09	09:10	11:17	
			12:05	16:28	
		12/09	09:02	11:05	
			12:05	16:30	
		13/09	08:00	11:05	
			12:00	16:10	
		16/09	08:02	11:00	
			12:00	16:35	
		17/09	08:25	11:05	
			12:00	16:50	
		18/09	08:13	11:00	
			11:55	16:35	
		19/09	07:56	10:55	
			12:03	16:30	
20/09	08:00	11:00	7,77		
Impregnação	CL06	12/03	09:00	11:05	
			12:00	16:25	
		13/09	07:55	11:05	
			12:00	04:10	
		16/09	07:55	11:00	
			12:00	16:45	
		17/09	08:23	11:05	
			12:00	16:50	
		18/09	08:12	11:00	
			11:55	16:35	
		19/09	07:45	10:55	
12:03	16:30				
20/09	08:00	11:00	7,09		

Continuação Tabela C.3

Local	Código	Data	Início	Fim	Volume (m ³)
Impregnação	CL07	12/09	09:00	11:05	6,86
			12:00	16:25	
		13/09	07:55	11:05	
			12:00	16:10	
		16/09	07:55	11:00	
			12:00	16:35	
		17/09	08:23	11:05	
			12:00	16:55	
		18/09	08:10	11:00	
			11:55	16:35	
		19/09	07:54	10:55	
			12:03	16:30	
			08:00	11:00	
		Costura	CL08	11/09	
12:05	16:25				
12/09	08:40			11:05	
	12:00			16:10	
13/09	07:45			11:00	
	12:00			16:45	
16/09	07:30			11:05	
	12:00			16:50	
17/09	08:10			11:00	
	12:00			16:35	
18/09	07:55			10:55	
	11:55			16:30	
19/09	07:47			10:58	
	12:00			16:23	
	07:47	11:00			

LISTA DE REFERÊNCIAS

- Altshuller B & Pastenarck B - Statistical measures of the lower limit of detection of a radioactivity counter. *Health Physics* 9: 293-298, 1963.
- Artaxo P. & Maenhaut W. - Trace element concentrations and size distribution of biogenic aerosols from the Anazon basin during the wet season. *Nucl. Inst. Meth.* 1989.
- Artaxo P., Rabello M.L.C. Maenhaut W. & Van Grieken R. - Trace element and individual analysis of atmospheric aerosols from Antarctic peninsula. *Tellus* 44B: 318-334, 1992.
- Azeredo A.M.G.F., Melo D.R., Dantas B. & Oliveira C.A.N. - An optimized method for simultaneous determination of uranium and thorium in urine and feces samples. *Rad. Prot. Dosm.* 37 (1): 51-54, 1991.
- Barnes J. - Distribution of inhaled radionuclides in respiratory tract. *Health Physics* 21: 227-232, 1971.
- Barros Leite C.V. - Estudo sistemático da ionização da camada L de átomos pesados por prótons. Tese de doutorado apresentada no Departamento de Física da PUC-RIO, 1977.
- Barros Leite C.V. - Análise de espectros de raios X, a publicar.
- Berglund R.N. & Lui B.Y.H. - Generation of monodisperse aerosol standards. *Environmental Science Technology* 7: 147-152, 1973.
- Bohgard, M. - Particle Induced X ray emission analysis complementary techniques for examination of aerosol in the environment of industry worker. Tese apresentada na universidade de Lund para obtenção do grau de doutor, 1983.
- British Standards Institution (BSI) - General principles of sampling airborne radioactive materials. BS 5243:1975.
- Carvalho S.M.M., Dias da Cunha, S.S., Baptista, B.G., Barros Leite C.V. & Paschoa A.S. - Particle size distribution of yellowcake in a brazilian uranium mill. *Anais do Occupational Hygiene*, 32: 865-870, 1988.
- Castanho A. & Cruz P.A. - Perfil analítico das terras raras. Ministério de Minas e energia - Departamento nacional de produção e mineração, boletim 28, Rio de Janeiro, 1973.
- Castanho, A. (Instituto Militar de Engenharia, Pr. Gen. Tibúcio n. 80, Rio de Janeiro, RJ, Brasil) Comunicação pessoal.
- Costa Ribeiro C.A.L. - Relatório parcial de pesquisa em andamento. Levantamento das condições de segurança radiofísica nas instalações da M. Agostini Comércio e Indústria S.A. Instituto de Biofísica, Universidade Federal do rio de Janeiro, 1972.

- Costa Ribeiro C., Barcinski M.A., Figueiredo N., Penna Franca E., Lobão N. & Krieger H. - Radiobiological aspects and radiation levels associated with milling of monazite sand. *Health Physics* 28: 225-231, 1975.
- Chan T.L. & Lippmann M. Experimental measurements and empirical modelling of regional deposition of inhaled particles in humans. *J. Am. Ind. Hyg. Assoc.* 41, 399-409, 1980.
- Chen Xing-an, Xiao Hui-juan, Chen Yong-e, Dong Zhi-hua, Yang Ying-jie, Chen Lian, Hao Jing-fang, He Qui-Chen, Feng Guo-long & Yun-hui - A follow-up study (1982-1991) on the relationship between thorium lung burden and health effects in miners at the Baiyan OBO rare earth and iron mine. *Radiation Protection in Australia* 11(4): 147-157, 1993.
- CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear. Diretrizes Básicas de Radioproteção. Norma CNEN NE 3.01. Rio de Janeiro, CNEN, 1988.
- CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear. . Norma CNEN NE 3.01. Rio de Janeiro, CNEN, 1988.
- Dang H.S., Jaiswal D.D., Murthy K.B. S., Sharné R.C., Nambiar P.P.V.J. & Sunta C.M. - Relevance of ICRP metabolic model of Th in bio-assay monitoring. *Journal Radioanalytical Nucl. Chem. Articles*, 156, 55-64, 1992.
- Dang H.S. & Sunta C.M. - Gastrointestinal absorption factor (f_1) for Th from diet. *Health Phys* 58, 220-221, 1990.
- Dantas B.M. - Proposta e aplicação de uma metodologia para monitoração de trabalhadores ocupacionalmente expostos a tório-232 e seus produtos de decaimento. Tese de mestrado apresentada no Instituto de Biofísica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1993.
- de Pinho A.G., Montenegro E.C., Barros Leite C.L., Baptista G.B. & Paschoa A.S. - Potencialidades e possíveis aplicações de um novo método analítico (PIXE). *An. Academia Brasileira de Ciências* 51: 365-393, 1979.
- Dias da Cunha, K. M. A. - Caracterização de partículas de tório e urânio existentes em poeira de monazita. Tese de mestrado apresentada no Instituto de Biofísica da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 1988.
- Dias da Cunha, K. M. A., Carvalho S.M.M., Barros Leite C.V., Baptista G.B. & Paschoa A.S. - Size distribution of airborne particulate in monazite dust. *Nucl. Inst. Meth.* A280, 492-494, 1989.
- Dias da Cunha, K. M. A., Lipsztein J.L. & Barros Leite C.V. - Occupational exposure to thorium air monitoring. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 177(1): 81-89, 1994.
- Dias da Cunha, K. M. A., Lipsztein J.L. & Barros Leite C.V. Utilização do método para análise de poeira de minério. *Anais do III Encontro de aplicações nucleares. Águas de Lindóia,*

- SP, Brasil, 1995.
- Dias da Cunha, K. M. A., Lipsztein J.L. Fang C.P. - A cascade impactor for mineral particle analysis. Aceito para publicação no Journal of Aerosol Science.
- Dorian M.D. & Bailey M. R. - Particle size distribution of radioactive aerosols measured in workplaces. Radiation Protection Dosimetry 60(2): 119-133, 1995.
- Douglas D.J. & Houk R.S. - Inductively coupled plasma mass spectrometry. Prog. anlyt. atom. spect. vol. 8, 1-18, 1985.
- Dyson N.A. - X-rays in atomic and nuclear physics. Editado por Longmann group limited. London, 1973.
- Fink R.W., Jopson R.C., Mark H. & Swift - Atomic fluorescence yields - Reviews of Modern Physics 38, 1966.
- Flores J., Adalpe F., Díaz R. V. & Crumpton D. - Set-up and improvements of PIXE facility at ININ, Mexico. Nucl. Inst. Meth. B75: 116-119, 1993.
- Fuchs N.A. - The mechanics of aerosols, traduzido do russo para o inglês por R. E. Dailey & M. Fuchs. Editado por C.N. Davies. Pergamon Press, 1964.
- Hartley B. M. & Hewson G.S. - Summary of radiation research in thorium (monazite) dosimetry. Radiation Protection in Australia.,11(4): 165-169, 1993.
- Hinds W.C. - Aerosol Technology - Properties, behavior and measurement of airborne particles. Willey -Interscience Publication, John Willey & Sons, 1982.
- Hering S.V., Richard C. Flagan & Sheldon K. Friedlander - Design and evaluation of a new low-pressure impactor. Env. Science & Tech. 12 (6): 667-671, 1978.
- Hewson G. S. - Particle size distribution of airborne radioactivity in mineral sands separation plants. Radiation Protection in Australia 6 (2): 35-49,1988.
- Holub, R.F. (US Bureau of mines, DFC, Denver, CO 80225, USA) Personal dust/silica samples as means of estimating short & long lived Rn daughter exposure of miners (a publicar).
- Hondors J. - Respirable versus inhalable dust sampling. Radiation Protection in Australia 53 83-89,1987.
- IEN - Instituto de Engenharia Nuclear, Coordenadoria de metalurgia e química. Supervisão de apoio químico, Laboratório de Raios X, Boletim de análise número 45/96, referência PA\66\96 de 27/08/96.
- International Atomic Energy Agency (IAEA) - Particle size analysis in estimating the significance of airborne contamination. Technical Report Series 179, Vienna, 1978.
- International Atomic Energy Agency (IAEA) - International Basic Safety Standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiadition sources. BSS, IAEA, Viena, 1994.
- International Commission on Radiological Protection - ICRP Publication 23 - Report of the task

- group on reference man, Pergamon Press, Oxford, 1975.
- International Commission on Radiological Protection - ICRP Publication 30. Limits for intakes of radionuclides by workers. Pergamon Press, Oxford, 1979.
- International Commission on Radiological Protection - ICRP Publication 56 - Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides. Part 1. Pergamon Press, Oxford, 1989.
- International Commission on Radiological Protection - ICRP Publication 67 - Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides. Parts 2, Ingestion dose coefficient. Elsevier Science Ltd. Oxford, 1993.
- International Commission on Radiological Protection - ICRP Publication 66. Human respiratory tract model for radiological protection. Pergamon Press, Oxford, 1994 (a).
- International Commission on Radiological Protection - ICRP Publication 69 - Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides. Parts 3. Elsevier Science Ltd. Oxford, 1994 (b).
- Johansson S.A.E., Johansson T.B. - Analytical application of particle induced X ray emission. Nuclear Instrument and Method 137: 473-516, 1976.
- John W., Hering S. Reischl G., Sasaki G. & Goren S. - Characteristics of Nuclepore filters with large pore size - I - Physical properties. *Atm. Env.* 17(1): 115-119, 1983a.
- John W., Hering S. Reischl G., Sasaki G. & Goren S. - Characteristics of Nuclepore filters with large pore size - II - Filtration properties. *Atm. Env.* 17(2): 373-382, 1983b.
- Julião L.M.Q.C., Azeredo AM.G.F., Santos M. S. Mello D. R. Dantas B.M. Lipsztein j. L. - Interpretation of thorium bioassay data. *J. Radiochemical and Nuclear Chemistry*, 177(1): 121-126. 1994.
- Khurshid A. - Aerosol size characteristics in selected working areas. Kernforschungsanlage, Jülich, GmbH, ISSN0366-0885, May 1984.
- Kiss I., Koltay E., Szabó G.Y, Mészáros A., László S. & Godény S. - Proton induced X ray emission as tool for analysis biological and atmospheric samples. *Anais do 10th Annual Meeting of European Society of Nuclear Methods in Agriculture*, 1980.
- Kunston E.O. - Extended electric mobility method for measuring aerosol particle size. In: *Fine particle aerosol generation. Measurement, sampling and analysis*. Edited by B.Y.Lui, Academic Press, N.Y, 1976.
- Linsalata P., Eisenbund M., & Penna Franca E. - Ingestion estimates of Th and light rare earth elements based on measurement of human feces. *Health Physics* 50 (1), 163-167, 1986.
- Lippmann M. - Deposition and clearance of inhaled particles in the human nose. *Ann. Otol. Rhinol. Laryngol.* 79: 519-578, 1970.

- Lippmann M. (a) - Size selective health hazard sampling. In: Air sampling instruments for evaluation of atmospheric contaminants. pp 163-198. 7ª edição, Editado por Susanne V. Hering, 1989.
- Lippmann M.(b) - Calibration of air sampling instruments. In: Air sampling instruments for evaluation of atmospheric contaminants. Editado por Susanne V. Hering, 7ª edição, 77-109, 1989.
- Lippmann M. & Albert - The effects of particles size on the regional deposition of inhaled aerosols in the human respiratory tract. Amer. Ind. Hyg. J. 30: 257, 1969.
- Lippmann M. & Chan T.L. - Calibration of dual-inlet cyclones for "respirable" mass sampling. American Industrial Hygiene 34(4): 189-200, 1974.
- Lippmann M. & Harris W. B. - Size selective samplers for estimating "respirable" dust concentration. Health Physics 8, 155-163, 1962.
- Lipsztein J.L., Grynsan D., Dantas B.M., Bertelli L. & Wrenn M.E. - Thorium exposure: Problems in bioassay interpretation. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 156 (2): 389-400, 1992.
- Lipsztein J.L., Bertelli L., Oliveira C.A.N., Azeredo A.M.G., Melo D.R., Lourenço M.C., Grynsan D. & Dantas B.M. - Bioassay Monitoring studies for thorium. Radiation prot. Dosim. 26 (1): 57-60, 1989.
- Lui B. Y. H. & Pui D. Y. H. - Electrical neutralization of aerosols. Aerosol Science 5: 465-472, 1974.
- Lui B. Y. H. & Pui D. Y. H. - On the Performance of the Eletrical Aerosol Analyser. J. Aerosol Sci. 6: 249-264, 1975.
- Maletskost C. J. , Keane A.T. , Telles N. C. & Evans R. D. - The metabolism of intravenously administered radium and thorium in human beings and the relative absorption from the human gastrointestinal tract of radium and thorium in simulated radium dial paints. In: Radium and mesothorium poisoning and dosimetry and instrumentation techniques in applied radioactive (MIT 952-3), 202-317, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 1969.
- Mafra Guidicini O.Y., Paschoa A.S., Saad S. & Goldenberg J. - Radioactive risk associated with minig activities. Trabalho apresentado no Specialists meeting on method for comparative risk assement of different energy sources. Studswck, Suécia, Agosto, 1991
- Margulis W. - Implantação do método de análise por PIXE e aplicação a análise deaerossóis. Tese de mestrado apresentada no Departamento de Física da PUC-RIO, 1977.
- Marple V.A. - Impactor Calculator. Sierra Instruments. Inc. 1978.
- Marple V. A. & Lui B.Y.H. - Characteristics of laminar jet impactor. Env. Sci. & Tech. 8(7):

- 648-654, 1974.
- Marple V. A., Lui B.Y.H & Whitby K. - Fluid mechanics of laminar flow aerosols impactors. *Aerosols Science* 5: 1-16, 1974.
- Marple V. & Willeke K. - Inertial impactor: Theory, design and use. Editado por B.Y.H. Academic Press Inc., 1975.
- Mason G.C., Cooper M. B., Salomon S.B. & Wilks M.J. - Evaluation of radiological hazards associated with mineral sandmining. In: Occupational radiation safety in mine, Anais da International Conference Toronto, Canadian Nuclear Association. Editado por Stocker H., 607-612, Toronto, Canadá, 1985
- Mercer T. T. - On the calibration of cascade impactor. *American Industry Hygiene Journal*, 6: 1-14, 1963.
- Mercer T.T. - The interpretation of cascade impactor data. *American Industrial Hygiene Journal* 236-241, 1965.
- Mercer T.T - Production and Characterization of Aerosols. *Arch. Intern. Med.* 131, 39-50, 1973.
- Miguel A.H. - On the determination of Benzo (A) Pyrene in atmospheric aerosols fractionated by a low pressure impactor, by TLC separation and in situ spectrometry fluoremetry at the picogram level. Relatório de pesquisa em andamento. departamento de química da PUC-RIO, 1981.
- Mitchel R. I. and J.M. Pilcher. *Batelle Memorial Institute, Ind. and Eng. Chemistry*, 51(9): 1039, 1959.
- Montenegro E.C. - Contribuição ao método de análise de elementos por espectrometria de raios X induzidos por prótons. Tese de mestrado apresentada no Departamento de Física da PUC-RIO, 1977.
- Montenegro E.C., Baptista G.B., Paschoa A.S. & Barros Leite C.V. - Uncerties in elemental quantitative analysis by PIXE. *Nuclear Instruments and Method* 159: 153-159, 1979.
- Morgan A., Black A., Moores S. R., Pritchard J.N., Walsh M. & Lambert B.E. - Alveolar deposition of sized particles of $^{239}\text{PuO}_2$ in the Mouse. *Radiation Research* 93: 85-92, 1983.
- Narayana Y., Radhkrishna, Somashekarappa, Karunakara N. & Balakrishna K.M., Siddapa - Distribution and enrichment of radionuclides in newly discovered high background area in ULLAL on Southwest coast India. *Health Physics* 69 (2), 1995.
- Nelson J.W. & Courtney W.J. - Ligth element analysis by proton scattering. *Nucl. Inst. Meth.*, 142: 127-130, 1977.
- Oodo T., Takashima Y, Hanzawa M. - An experimental study of adhesion of particles with a round nozzle impactor. *Journal of Chemical Engineering of Japan* 14(1), 76-78, 1981.

- Papastefanou C.- Radiation Impact from Lignite burning due to ^{226}Ra Greek coal-fire power plants. *Health Physics* 70 (2): 187-191, 1996.
- Parker R.D., Buzzard G.H. Dzubay & Bell J.D. - A two stage respirable aerosol sampler using Nuclepore in series. *Atm. Env.* 11: 617-621, 1977.
- Paschoa, A.S. - The monazite cycle in Brazil: past, present and future. in *Actinides Processing Methods and Material* Brayindra Mishra Wilianm A. A., editors). The Minerals, Metals & Materials Society, 323-338, 1994.
- Paschoa, A.S., Montenegro E.C., Margulis W., de Pinho A.G. Barros Leite C.V. & Baptista G.B. 3rd Int. Conf. on Nuclear Method in Environmental and Energy Research, Columbia, Missouri, USA. Editado por James R. Vogt, CONF-771072 USRDA-21 1977.
- Pessoa S. A. Estudo sobre a fração Grossa da Distribuição de Tamanho de Aerossóis Atmosféricos. Tese de mestrado apresentada no Instituto de Física da Universidade de São Paulo, 1987.
- Raabe, O. G. - Aerosol Aerodynamic size conventions for inertial sampler calibration. *Journal of Air Pollution Control Association*, 26 (9): 856-860, 1976.
- Raabe, O.G. Aerosol aerodynamic size airborne particles. In: *Internal radiation dosimetry*. Health Physics Society School. Editado por Otto Raabe, Medical Physical Publishing, 1994.
- Ranz, W. E. & Wong, J. B. - Impaction of dust and Smoke particles. *Ind. Eng. Chem.* 44(6): 1371-1381, 1952.
- Rao, A. K. & Whitby, K. T. - Non-ideal collection characteristics of inertial Impactors - I - Single stage impactors and solid particles. *J. Aerosol Sci.*, 9: 77-86, 1978a.
- Rao, A. K. & Whitby, K. T. - Non-ideal collection characteristics of inertial Impactors - II - Cascade impactors. *J. Aerosol Sci.*, 9: 87-100, 1978b.
- Roser F.X. & Cullen T.L. Environmental radioactivity in high background areas in Brazil. Departamento de Física PUC-RIO, 1962.
- Relatório da Instalação B, não autorizada a divulgação.
- Sachet I.A., Laura D.C. & Nobrega A.W. - Determination of uranium isotopes by chemical stripping and spectrometry. *Health Physics* 46(1): 133-139, 1984.
- Santos M.S. & Nascimento M.O.R. Otimização do método radioquímico para determinação de tório e urânio em fezes. *Anais do III Encontro de aplicações nucleares*. Águas de Lindóia, SP, Brasil, 1995.
- Snipes M.B. Biokinetics of inhaled radonuclides. In: *Internal Radiation Dosimetry*. Editado por Raabe O. G., Medical Physics Publishing 181-196, 1994.
- Sohrabi M. - Recent radiological studies of high level natural radiation areas of Ramsar. ICHLNR, 39-47. Ramsar, Novembro de 1990.

- Stover B.J., Atherton D.R. Keller N. & Buster D.S. -Metabolism of the ^{228}Th decay series in adult beagles dogs I: $^{228}\text{Th}(\text{RdTh})$. Radiation Research 12: 657-671, 1960.
- Streeter V.L. - Mecânica dos Fluidos, Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda, 1979.
- Sunta C.M. - A review of the studies of high background areas of the S-W coast of India. ICHLNR. Rasmur, Novembro de 1990.
- Task Group on Lung Dynamics - Deposition and retention models for inertial dosimetry of human respiratory tract. Health Physics 12: 173-207, 1966.
- Terry K.W. & Hewson G.S. Thorium lung burdens of mineral sand workers. Health Physics 69(2): 233-242, 1995.
- Terry K.W., Hewson G.S. & Meunier - Thorium excretion in feces by mineral sands workers. Health Physics 69 (1): 105-109, 1993.
- TSI - Eletrostatic Classifier - Model 3071 Eletrostatic classifier instrution manual, 1985.
- TSI - Ultrafine Condensation Particle Counter - Model 3025/3027, Ultrafine condensation particle counter, Instrution manual, 1990.
- TSI - VOAG - Model 3050 - VOAG, Instrution manual, 1985.
- Vicent J. H. and Mark D. - On the quantitative definition on inhalability of airborne dust. Ann. Occup.Hyg.. Vol. 24(2): 245-248,1981.
- Watson J. Deposition and clearance of inhaled particles. International Radiation Dosimetry - In: Principles and practice. Health Physics Society Summer School, 1983.
- Willeke K and Baron P. A. Aerosol Measurement - Principal Techniques and Applications. Editado por Nostrand Reinhold. Nova Iorque, 1993.
- Zemansky M. W.. Heath and Thermodynamics. Fifth edition. Editora McGraw-Hill1957(68).
- Wang Z. Y., Lubin J.H., Long-De W., Conrath S., Zhang S., Kleinerman R., Shang B., Gao X.S., Gao-su P.Y & Boice J. D. Jr. - Radon measurements in underground dwellings from two prefectures in Chine. Health Physics 70 (2): 191-198, 1996.