BIBLIOTECA
INSTITUTO DE QUÍMICA
Universidade de São Paulo

20687

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE QUÍMICA

AVALIAÇÃO DO RISCO A EXPOSIÇÃO OCUPACIONAL A METAIS EM
INCINERADORES DE RESÍDUOS DE SERVIÇOS DE SAÚDE

Danielle Polidorio Intima

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ORIENTADORA

PROFa. Dra. ELISABETH DE OLIVEIRA

SÃO PAULO

Abril de 2004

“Avaliação do risco a exposição ocupacional a metais em incineradores de resíduos de serviços de saúde”

DANIELLE POLIDORIO INTIMA

Dissertação de Mestrado submetida ao Instituto de Química da
Universidade de São Paulo como parte dos requisitos necessários à
obtenção do grau de Mestre em Química - Área: Química Analítica.

Aprovada por:

Elisabeth de Oliveira

Profa. Dra. ELISABETH DE OLIVEIRA
IQ – USP
(Orientadora e Presidente)

Lilian R.T. Franco

Profa. Dra. LILIAN ROTHCHILD FRANCO DE CARVALHO
IQ - USP

CS

Prof. Dr. CARLOS SÉRGIO DA SILVA
FUNDACENTRO - SP

SÃO PAULO
20 DE FEVEREIRO DE 2004.

Dedico este trabalho ao meu esposo, Marcelo, que nos bons e maus momentos tanto incentivou para que eu concluísse mais esta etapa de minha formação profissional. Certamente, sem seu apoio, dedicação e compreensão nada teria sido possível.

Agradecimentos

À Dra. Elisabeth de Oliveira, pela orientação, amizade, apoio e confiança em mim depositado durante o desenvolvimento do presente trabalho.

À Dra. Maria Grícia de Lourdes Grossi, pelo apoio, amizade e respeito.

À Fundacentro, por fornecer todo o material utilizado na coleta de amostras.

A assessoria da FAPESP, pelo apoio financeiro concedido a realização do trabalho.

À Universidade Presbiteriana Mackenzie, pela oportunidade concedida de cursar o mestrado.

À Profa. Dra. Márcia Guekezian pelo apoio, amizade e incentivo.

Ao Prof. Dr. Rogério Aparecido Machado, pelo apoio, amizade e compreensão durante todos os momentos.

Aos amigos da Fundacentro, pelo apoio na realização das amostragens, tratamento de dados, além do agradável convívio.

Aos amigos do LEEAA, pela agradável convivência ao longo desses anos de trabalho.

Aos amigos do laboratório químico da Universidade Presbiteriana Mackenzie, pelo apoio e compreensão durante todos os momentos.

Ao Amarildo Soares, pelo apoio, dedicação e confiança ao longo desses anos de trabalho.

A todos os mais sinceros agradecimentos

RESUMO

O trabalho teve como objetivo avaliar o risco a exposição ocupacional a metais em incineradores de resíduos de serviços de saúde, com o intuito de verificar as condições de trabalho das usinas de incineração, a fim de proteger a saúde dos trabalhadores do setor e evitar danos ao meio ambiente.

Resíduos de serviços de saúde são resíduos sépticos caracterizados como resíduo Classe I por apresentarem patogenicidade, portanto, seu estudo é de extrema importância para a saúde pública e para qualidade do meio ambiente.

Um dos processos de tratamento recomendado pela legislação para este tipo de resíduo consiste na incineração. Este processo baseia-se na decomposição térmica via oxidação, com o objetivo de minimizar a toxicidade e o volume dos resíduos.

A presença de metais nos resíduos a serem incinerados é uma preocupação, pois este processo provoca a partição do metal presente nos resíduos de alimentação da câmara de combustão, podendo ocorrer sua emissão juntamente com as cinzas, ou com os resíduos do sistema de controle de poluição ou, até mesmo, através da chaminé dependendo de sua volatilidade.

Em face desta problemática, faz-se necessária avaliação do risco ocupacional gerado pela exposição ao material particulado e aos gases tóxicos gerados pelo processo. Esta avaliação consiste na caracterização das partículas através da medição de seus constituintes em massa por volume de ar do ambiente de trabalho amostrado.

Para isso, foi aplicada metodologia específica e reconhecida do National Institute of Organization Safety Health (NIOSH), o qual recomenda para a amostragem de mercúrio a utilização de resina hopcalite, e para o demais metais a utilização de filtro de éster de celulose. Como técnicas analíticas, este instituto recomenda a utilização da espectrometria de

absorção atômica por geração de vapor frio para determinação de mercúrio e da espectrometria de emissão atômica com plasma de argônio induzido para os demais metais.

De acordo com os resultados, foram obtidas concentrações acima do limite estabelecido para arsênio, berílio, cádmio, chumbo e mercúrio. Portanto, foram propostas alterações tecnológicas no processo e adequação dos equipamentos de proteção, com o intuito de proteger a saúde dos trabalhadores, da população e evitar danos ao meio ambiente.

ABSTRACT

This project aimed to evaluate the risk of metal occupational exposition in hospital waste incinerators, in order to verify the incineration plant work conditions, to protect the workers' health and to avoid damage to the environment.

Hospital waste is septic, characterized as Hazardous Waste (Class I) due to its patogenicity, therefore their study is extremely important for public health and environment quality.

One of the legally recommended treatment processes to this kind of waste is the incineration. This process is based on thermal decomposition by oxidation, to minimize the toxicity and the waste volume.

The presence of metal in the waste to be incinerated is a concern, because this process causes the partition of the metal present in the feeding waste of the combustion camera, which could lead to its emission together with the ash or even with the pollution control system waste, or, even, through the chimney, depending on its volatility.

Due to this issue, occupational risk evaluation generated by exposition to particulate material and toxic gases emitted by the process rests necessary. This evaluation consists of particle characterization by measuring the constituents in mass per volume of the environmental sampling air.

In order to reach it, specific and recognized methodology from the National Institute of Organization Safety Health (NIOSH) was applied, which recommends for mercury sampling the use of hopcalite resin, and for the other metals the use of cellulose filter. As analytic techniques, this institute recommends the use of cold vapor atomic absorpiton spectrometry to mercury determination and the inductively coupled plasma emission spectrometry to the other metals.

According to the results, the obtained concentrations were above the limit established for arsenic, beryllium, cadmium, lead and mercury. Therefore, technological alterations were proposed in the process and adaptation of the protection equipments, in order to protect the employees' health, the population health and to avoid damage to the environment.

Lista de figuras

Figura 1: Esquema da evolução de uma planta dos anos 50 para os anos 90

Figura 2: Esquema do processo de incineração

Figura 3: Esquema das principais regiões do trato respiratório e sua correspondência com as frações inalável, torácica e respirável

Figura 4: Nebulizador pneumático de tubo concêntrico

Figura 5: Representação do incinerador na parte interna do galpão e distribuição dos pontos fixos de amostragem no incinerador

Figura 6: Representação do incinerador na parte interna do galpão e distribuição dos pontos fixos de amostragem no incinerador

Figura 7: Esquema da montagem dos cassetes

Figura 8: Comparação da média dos Limites Superiores de Confiança obtidos na jornada de trabalho dos incineradores A e B com os limites de concentração adotados para Be, As e Cd.

Figura 9: Comparação da média dos Limites Superiores de Confiança obtidos na jornada de trabalho dos incineradores A e B com os limites de concentração adotados para Ni, Se, Ag, Tl, Pb e Hg.

Figura 10: Comparação da média dos Limites Superiores de Confiança obtidos na jornada de trabalho dos incineradores A e B com os limites de concentração adotados para Cr, Cu, Sb e Ba.

Figura 11: Comparação da média dos Limites Superiores de Confiança obtidos na atividade de maior risco dos incineradores A e B com os limites de concentração adotados para Be, As e Cd.

Figura 12: Comparação da média dos Limites Superiores de Confiança obtidos na atividade de maior risco dos incineradores A e B com os limites de concentração adotados para Ni, Se, Ag, Tl, Pb e Hg.

Figura 13: Comparação da média dos Limites Superiores de Confiança obtidos na atividade de maior risco dos incineradores A e B com os limites de concentração adotados para Cr, Cu, Sb e Ba.

Lista de tabelas

Tabela 1: Desenvolvimento das exigências para emissão de incineração de resíduos Alemanha e União Européia e limites de emissão adotados pelo CONAMA no Brasil

Tabela 2: Características de alguns dos principais incineradores instalados no Brasil

Tabela 3: Concentrações de referência no ar segundo EPA

Tabela 4: Prováveis fontes de emissão dos metais avaliados

Tabela 5: Divisão do trato respiratório em bases anatômicas de referência segundo o mecanismo de deposição das partículas

Tabela 6: Número de amostras coletadas por dia de amostragem no incinerador A

Tabela 7: Número de amostras coletadas por dia de amostragem no incinerador B

Tabela 8: Parâmetros instrumentais utilizados no ICP-OES

Tabela 9: Parâmetros instrumentais utilizados no EAA

Tabela 10: Valores de limite de quantificação para as análises de metais das amostras de jornada parcial e de tarefa de maior risco $\mu\text{g m}^{-3}$

Tabela 11: Limites de concentração adotados em várias instituições internacionais em $\mu\text{g m}^{-3}$

Tabela 12: Valores encontrados para o arsênio para as amostragens individual e de ponto fixo de jornada parcial de trabalho

Tabela 13: Valores encontrados para o arsênio para as amostragens individual e de ponto fixo de tarefa de maior risco – limpeza do forno

Tabela 14: Valores encontrados para o arsênio para as amostragens individuais da jornada

parcial de trabalho

Tabela 15: Valores encontrados para o arsênio para as amostragens de ponto fixo da jornada parcial de trabalho

Tabela 16: Valores encontrados para o berílio para as amostragens individual e de ponto fixo de jornada parcial de trabalho

Tabela 17: Valores encontrados para o berílio para as amostragens individual e de ponto fixo de tarefa de maior risco – limpeza do forno

Tabela 18: Valores encontrados para o berílio para as amostragens individuais de jornada parcial de trabalho

Tabela 19: Valores encontrados para o berílio para as amostragens de ponto fixo de jornada parcial de trabalho

Tabela 20: Valores encontrados para o cádmio para as amostragens individual e de ponto fixo de jornada parcial de trabalho

Tabela 21: Valores encontrados para o cádmio para as amostragens individual e de ponto fixo de tarefa de maior risco – limpeza do forno

Tabela 22: Valores encontrados para o cádmio para as amostragens individuais da jornada parcial de trabalho

Tabela 23: Valores encontrados para o cádmio para as amostragens de ponto fixo de jornada parcial de trabalho

Tabela 24: Valores encontrados para o cádmio para as amostragens individual e de ponto fixo de jornada parcial de trabalho

Tabela 25: Valores encontrados para o cromo para as amostragens individual e de ponto fixo de tarefa de maior risco – limpeza do forno

Tabela 26: Valores encontrados para o cádmio para as amostragens individuais de jornada parcial de trabalho

Tabela 27: Valores encontrados para o cádmio para as amostragens de ponto fixo de jornada parcial de trabalho

Tabela 28: Valores encontrados para o mercúrio para as amostragens individual e de ponto fixo de jornada parcial de trabalho

Tabela 29: Valores encontrados para o mercúrio para as amostragens individual e de ponto fixo de tarefa de maior risco – limpeza do forno

Tabela 30: Valores encontrados para o mercúrio para as amostragens individuais de jornada parcial de trabalho

Tabela 31: Valores encontrados para o mercúrio para as amostragens de ponto fixo de jornada parcial de trabalho

Tabela 32: Valores encontrados para o chumbo para as amostragens individual e de ponto fixo de jornada parcial de trabalho

Tabela 33: Valores encontrados para o chumbo para as amostragens individual e de ponto fixo de tarefa de maior risco – limpeza do forno

Tabela 34: Valores encontrados para o chumbo para as amostragens individual de jornada parcial de trabalho

Tabela 35: Valores encontrados para o chumbo para as amostragens de ponto fixo de jornada parcial de trabalho

Tabela 36: Valores encontrados para o níquel para as amostragens individual e de ponto fixo de jornada parcial de trabalho

Tabela 37: Valores encontrados para o níquel para as amostragens individual e de ponto fixo

de tarefa de maior risco – limpeza do forno

Tabela 38: Valores encontrados para o tálio para as amostragens individual e de ponto fixo de jornada parcial de trabalho

Tabela 39: Valores encontrados para o tálio para as amostragens individual e de ponto fixo de tarefa de maior risco – limpeza do forno

Tabela 40: Valores encontrados para o tálio para as amostragens individuais de jornada parcial de trabalho

Tabela 41: Valores encontrados para o tálio para as amostragens de ponto fixo de jornada parcial de trabalho

Tabela 42: Valores encontrados para o cobre para as amostragens individual e de ponto fixo de jornada parcial de trabalho

Tabela 43: Valores encontrados para o cobre para as amostragens individual e de ponto fixo de tarefa de maior risco – limpeza do forno

Tabela 44: Valores encontrados para o cobre para as amostragens individuais de jornada parcial de trabalho

Tabela 45: Valores encontrados para o cobre para as amostragens de ponto fixo de jornada parcial de trabalho

Tabela 46: Valores encontrados para o selênio para as amostragens individual e de ponto fixo de jornada parcial de trabalho

Tabela 47: Valores encontrados para o selênio para as amostragens individual e de ponto fixo de tarefa de maior risco – limpeza do forno

Tabela 48: Valores encontrados para o selênio para as amostragens individuais de jornada parcial de trabalho

Tabela 49: Valores encontrados para o selênio para as amostragens de ponto fixo de jornada parcial de trabalho

Tabela 50: Valores encontrados para o bário para as amostragens individual e de ponto fixo de jornada parcial de trabalho

Tabela 51: Valores encontrados para o bário para as amostragens individual e de ponto fixo de tarefa de maior risco – limpeza do forno

Tabela 52: Valores encontrados para o bário para as amostragens individuais de jornada parcial de trabalho

Tabela 53: Valores encontrados para o bário para as amostragens de ponto fixo de jornada parcial de trabalho

Tabela 54: Valores encontrados para o antimônio para as amostragens individual e de ponto fixo de jornada parcial de trabalho

Tabela 55: Valores encontrados para o antimônio para as amostragens individual e de ponto fixo de tarefa de maior risco – limpeza do forno

Tabela 56: Valores encontrados para o antimônio para as amostragens individuais de jornada parcial de trabalho

Tabela 57: Valores encontrados para o antimônio para as amostragens de ponto fixo de jornada parcial de trabalho

Tabela 58: Valores encontrados para a prata para as amostragens individual e de ponto fixo de jornada parcial de trabalho

Tabela 59: Valores encontrados para a prata para as amostragens individual e de ponto fixo de tarefa de maior risco – limpeza do forno

Lista de abreviaturas e símbolos

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hygienists (Associação americana de técnicos na área de higiene de trabalho)
Ag	Prata
As	Arsênio
Ba	Bário
Be	Berílio
Cd	Cádmio
CMPT	Concentração Média Ponderada pelo Tempo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Cr	Cromo
Cu	Cobre
DPA	Desvio Padrão Aritmético
DPG	Desvio Padrão Geométrico
EPA/USEPA	Environmental Protection Agency (Agência de Proteção Ambiental Americana)
GHE	Grupo Homogêneo de Exposição
Hg	Mercúrio
ICP-OES	Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma de Argônio
LIMPURB	Empresa de Limpeza Urbana da Cidade de São Paulo
LC	Limite de Concentração
$\ln(LSC)$	Logaritmo neperiano do Limite Superior de Confiança
LSC(95)	Limite Superior de Confiança para 95 % de intervalo de confiança

MA	Média Aritmética
MG	Média Geométrica
NBR	Normas Brasileiras
Ni	Níquel
NIOSH	National Institute of Occupational and Safety Health (Instituto Americano de Pesquisa em Segurança e Saúde Ocupacional)
ILO/OIT	Internacional Labour Organization (Organização Internacional do Trabalho)
OSHA	Occupational Safety and Health Administration (Agência americana de normatização e fiscalização em segurança e saúde ocupacional)
Pb	Chumbo
RSLP	Resíduos sólidos, líquidos e pastosos
RSS	Resíduos de Serviços de Saúde
Sb	Antimônio
Se	Selênio
Tl	Tálio
Tr.	Trabalhador

SUMÁRIO

1.	Introdução	1
1.1.	Legislação brasileira	2
1.1.1.	Incineração	4
1.1.2.	Higiene ocupacional	7
2.	Revisão Bibliográfica	10
2.1.	A evolução do processo de incineração	10
2.1.1.	No Brasil	10
2.1.2.	No mundo	13
2.1.3.	Vantagens e desvantagens do processo de incineração de resíduos	16
2.2.	Considerações gerais sobre o processo de incineração	17
2.2.1.	Presença de metais no processo de incineração de RSS	21
2.3.	Análise de metais emitidos pelo processo	25
2.3.1.	Amostragem	25
2.3.2.	Preparação de amostras assistida por radiação de microondas	28
2.3.3.	Técnicas de determinação	29
2.3.3.1	Fundamentos da espectrometria de emissão atômica com plasma de argônio induzido	30
2.3.3.2	Princípios da técnica de espectrometria de absorção atômica com geração de vapor frio de mercúrio	32
2.4.	Exposição ambiental e humana às emissões de incineradores	34
2.4.1.	Aspectos toxicológicos e propriedades dos metais	35
3.	Objetivo	49

4.	Experimental	50
4.1.	Termos e definições	50
4.2.	Local/Incinerador amostrado	52
4.3.	Estratégia de amostragem	54
4.4.	Coleta de amostra	58
4.5.	Montagem dos porta-filtros	60
4.6.	Instrumentação	61
4.7.	Reagentes e soluções	64
4.8.	Preparação das amostras	65
4.9.	Limite de Quantificação	66
5.	Resultados e discussões	68
5.1.	Considerações para a interpretação dos resultados	68
5.2.	Resultados obtidos	74
5.2.1.	Metais cancerígenos	74
5.2.2.	Metais não cancerígenos	87
5.2.3.	Considerações gerais sobre os resultados	111
6.	Conclusões	115
7.	Referências Bibliográficas	117
	APÊNDICE A - Resultados analíticos obtidos sem tratamento estatístico	121
	ANEXO A - Modelo do relatório dos dados de coleta de amostras de ar registrados pela bomba de amostragem	130
	ANEXO B - Fotos do incinerador A	131
	ANEXO C - Fotos do incinerador B	138
	ANEXO D - Incineradores cadastrados no estado de São Paulo	144

1. INTRODUÇÃO

Os resíduos de serviços de saúde, também conhecidos por RSS, constituem os resíduos sépticos, que contêm ou potencialmente podem conter germes patogênicos. São produzidos em serviços de saúde, tais como: hospitais, clínicas, laboratórios, farmácias, clínicas veterinárias, postos de saúde, universidades, dentre outros estabelecimentos do setor. São agulhas, seringas, gazes, bandagens, algodões, órgãos e tecidos removidos, meios de culturas e animais usados em testes, sangue coagulado, luvas descartáveis, remédios com prazos de validade vencidos, instrumentos de resina sintética, filmes fotográficos de raios X e outros.

Resíduos assépticos destes locais, constituídos por papéis, restos de alimentos, resíduos de limpezas gerais e outros materiais, que não entram em contato direto com pacientes ou com os resíduos sépticos anteriormente descritos, são considerados como domiciliares.¹

De acordo com a natureza das fontes de geração, estes resíduos podem ser classificados em quatro grupos distintos:

Grupo I: resíduos gerados em estabelecimentos de serviços de saúde que não estão diretamente relacionados a atividades médicas, são eles: resíduos de cozinha, de produtos de limpeza, papéis, jornais, revistas, plásticos e recipientes diversos. Estes resíduos devem ser armazenados separadamente para uma possível reciclagem ou, no caso de resíduo orgânico, seguir para um processo de compostagem.

Grupo II: resíduos gerados em estabelecimentos de serviços de saúde que estão diretamente relacionados a atividades médicas, que não apresentem risco à saúde ou ao ambiente, são eles: resíduos materiais com manchas de sangue, gaze e materiais usados no tratamento de doenças não infecciosas, equipamentos médicos usados, matrizes, animais mortos ou partes anatômicas que não tenham sido inoculados com agentes infectantes.

Grupo III: resíduos gerados em estabelecimentos de serviços de saúde que estão diretamente relacionados a atividades médicas e apresentam riscos a saúde e ao ambiente devido sua patogenicidade, são eles: agulhas e bisturis, gaze e materiais usados no tratamento de doenças infecciosas, animais mortos ou partes anatômicas que tenham sido inoculados com agentes infectantes. Estes resíduos não devem ser compactados, devem ser manipulados com o máximo cuidado, armazenado de forma a evitar qualquer risco de contaminação.

Grupo IV: resíduos gerados em estabelecimentos de serviços de saúde constituídos por restos de medicamentos, materiais que tiveram contato com agulhas, seringas, cateteres, luvas e outros materiais. Estes resíduos também apresentam risco de contaminação biológica.²

Com base nesta classificação, os estabelecimentos de serviços de saúde podem segregar seus resíduos de maneira a evitar a contaminação dos resíduos assépticos proporcionando uma minimização do risco em sua própria fonte. Destinando apenas os resíduos perigosos, mencionados nos grupos III e IV, para tratamentos especiais como, por exemplo, a incineração.^{3,4}

1.1. Legislação brasileira

Até 1976, os resíduos de serviços de saúde eram de responsabilidade dos hospitais que os incineravam nos próprios estabelecimentos conforme lei estadual. Como a maioria dos incineradores não operava adequadamente e estava contribuindo para a poluição ambiental, estes foram paralisados. Assim, os três incineradores municipais, em atividade na época, passaram a funcionar somente com lixo hospitalar para queimar os resíduos infectantes. Como consequência, foi publicado o Decreto n. 14.405 de 08/03/1977 que regulamentou, pela primeira vez, a coleta de lixo proveniente de estabelecimentos hospitalares e similares no Município de São Paulo.¹

Os resíduos de serviços de saúde representam cerca de 1% do total de resíduos sólidos urbanos coletados, uma coleta média de 160 toneladas ao dia em São Paulo. Seu estudo é particularmente importante para a segurança dos estabelecimentos geradores, para a saúde pública e para a qualidade do meio ambiente. Isto porque estes resíduos apresentam características perigosas (Resíduo classe 1 – Patológico – segundo a NBR 10.004 da ABNT) e necessitam forma especial de tratamento, que vai desde os cuidados no próprio estabelecimento gerador, tais como acondicionamento e armazenagem adequadas, até a remoção, transporte, tratamento e destino final dos resíduos.⁵ Segundo a Limpurb 2000:

- “Todos os resíduos de serviços de saúde devem ser embalados em sacos plásticos branco-leitosos que são mais resistentes e estão de acordo com a NBR 9190 da ABNT. Os materiais perfurocortantes, tais como agulhas, lâminas de bisturi, dentre outros, devem ser embalados em recipientes rígidos previamente ao saco branco leitoso. Os sacos plásticos devem ser preenchidos até 2/3 da sua capacidade para facilitar a amarração. Os resíduos devem ser armazenados em contêineres, no caso de pequenos geradores, ou abrigos adequados, no caso de grandes geradores, a espera da coleta da Prefeitura Municipal de São Paulo.”
- Coleta diferenciada: é específica para a remoção de RSS e dispõe de sistema de menor compactação dos resíduos para que não promova o rompimento dos sacos e não permita o espalhamento de líquidos pela via pública. Esse tipo de coleta é necessário para que os RSS não sejam misturados a massa de resíduos provenientes da coleta domiciliar.
- Tratamento específico: promove a inertização dos resíduos eliminando suas características patogênicas. Após o tratamento, a escória que é o resíduo da incineração (cerca de 30% do volume inicial de resíduos), encontra-se inerte e pode ser disposta em aterros sanitários.

O serviço de coleta e transporte de RSS é terceirizado pela Prefeitura para empresas particulares, contratadas e fiscalizadas pela P.M.S.P. A coleta é gratuita e atende os

estabelecimentos previamente cadastrados na Limpurb. Atualmente, os RSS coletados têm sido tratados em usinas de incineração contratadas pela prefeitura, ou seja, o processo de tratamento também passou a ser terceirizado.^{6,7}

1.1.1. Incineração

Até 1979, todos os resíduos de serviços de saúde deveriam ser encaminhados aos incineradores municipais, de acordo com o estabelecido pela Portaria n. 53 do Ministério do Interior datada de 01/03/79, a qual estabelece que a incineração é a forma de tratamento mais adequada.

A obrigatoriedade de incineração não se adequou à realidade brasileira, principalmente por questões financeiras e técnicas. Logo, a Resolução do CONAMA n. 6 de 19/09/1991 desobrigou a incineração ou qualquer outro tratamento de queima dos resíduos sólidos provenientes dos estabelecimentos de serviços de saúde, portos e aeroportos. Alguns anos depois, a Resolução CONAMA nº 5 de 05/08/93 dispôs o plano de gerenciamento, tratamento e destinação final de resíduos sólidos de serviços de saúde, portos, aeroportos, terminais rodoviários e ferroviários, recomendando a esterilização a vapor ou a incineração.

Em 29 de outubro de 2002, foi publicada a Resolução N° 316 do CONAMA, que dispõe sobre procedimentos e critérios para funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. Nesta resolução estão fixados limites de emissão que devem ser considerados no monitoramento e no controle dos efluentes gasosos. Alerta-se que esses valores fixados, não são os utilizados atualmente na maioria dos países e na União Européia. Isto pode ser visto na Tabela 1, que apresenta o desenvolvimento das exigências de emissões na Alemanha e União Européia para incineradores. Conforme os limites de emissão se tornaram mais rigorosos, a tecnologia foi sendo aprimorada para garantir esses limites. Quando se comparam os limites

adotados na Resolução CONAMA, percebe-se que estes valores estão mais próximos dos valores adotados na década de 80. Disto pode-se concluir que as tecnologias que estão sendo avaliadas para serem usadas no Brasil também são desta década. Esta realidade é problemática, uma vez que se deve adotar limites de emissão que atendem a tecnologias obsoletas, sabendo-se que muitas das substâncias emitidas pela incineração são cancerígenas (As, Cd, Cr, HPAs, dioxinas e furanos etc). Para substâncias cancerígenas não existem limites seguros, o que existem são limites técnicos e negociados onde se adotam os menores valores possíveis.

Somado a isso, infelizmente, não se tem um programa de gerenciamento de resíduos mais amplo que, além de monitorar a emissão, também leve em conta o seguinte: 1) estudos epidemiológicos para avaliar a consequência dessa emissão na saúde da população, especialmente a do entorno dos incineradores; 2) uma prática de vigilância à saúde dos trabalhadores quando expostos ocupacionalmente a substâncias cancerígenas; 3) uma prática de manutenção preventiva dos equipamentos com a seriedade necessária e de operação consequente.⁸

Tabela 1: Desenvolvimento das exigências de emissões para o processo de incineração de resíduos na Alemanha e na União Européia e limites de emissão adotados pelo CONAMA no Brasil

Limites de Emissão mg m ⁻³ (valor médio diário)	Alemanha 1986 (TA Luft 1986)	Alemanha 1990 (17. BImSchV)	União Européia 2000 (Directiva 2000/76/CE)	CONAMA Nº 316 2002
	Base seca; 11% vol O ₂	Base seca; 11% vol O ₂	Base seca; 11% vol O ₂	Base seca; 7 % vol O ₂
Poeira total (MP)	30	10	10	70
Carbono Total	20	10	10	-
HCl	50	10	10	80
HF	2	1	1	5
SO _x (como SO ₂)	100	50	50	280
NO _x (como NO ₂)	500	200	200	560
CO	100	50	50	100
Metais pesados	<p>Σ Hg, Cd, Tl: 0,2</p> <p>Σ As, Co, Ni, Se, Te: 1,0</p> <p>Σ Sb, Pb, Cr, CN, F, Cu, Mn, Pt, Pd, Rh, V, Sn: 5,0</p>	<p>Σ, Cd, Tl: 0,05</p> <p>Hg: 0,05</p> <p>Σ Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn: 0,5</p>	<p>Σ, Cd, Tl: 0,05</p> <p>Hg: 0,05</p> <p>Σ Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V: 0,5</p>	<p>Σ Cd, Hg, Tl: 0,28</p> <p>Σ As, Co, Ni, Te, Se: 1,4</p> <p>Σ Sb, Pb, Cr, CN, Cu, Sn, F, Mn, Pt, Pd, Rh, V: 7,0</p>
Dioxinas/furanos	-	0,1 ng m ⁻³	0,1 ng m ⁻³	0,5 ng m ⁻³

1.1.2. Higiene ocupacional

O objetivo principal da higiene ocupacional é a antecipação e prevenção de riscos ao desenvolvimento de doenças profissionais que podem ser originadas por agentes nocivos presentes no ambiente de trabalho. A prevenção é realizada através de ações destinadas a evitar precocemente qualquer alteração fisiológica que implique em alguma resposta danosa à saúde dos trabalhadores. Para cumprir este objetivo, a higiene ocupacional está continuamente desenvolvendo e aperfeiçoando uma série de metodologias que, através da detecção, quantificação e controle dos possíveis contaminantes presentes no ambiente de trabalho, evitem o surgimento das doenças profissionais.

Neste contexto, a avaliação ambiental é um diagnóstico sobre a situação produzida por um ou vários fatores ambientais e inclusive a ação combinada deles, baseada nos dados obtidos em medições ou estimadores da exposição e comparados com critérios ou padrões de exposição.⁹

Os padrões de exposição, ou concentrações máximas a que um trabalhador pode estar exposto durante a jornada de trabalho, tomam por base características dos contaminantes considerando todos os fatores adversos como irritação ocular, odor, irritação à pele e outros. Em geral, estes padrões são estabelecidos com base no menor nível capaz de produzir efeitos tóxicos, também designados como *threshold toxicity value* (TLV), os quais estão muito aquém de efeitos letais.¹⁰ Os limites máximos de exposição recomendados são expressos com base no tempo medido médio, ou *time weight average* (TWA), que normalmente, pressupõe uma exposição de 8 horas por dia em semanas de 40 horas. No estabelecimento desses padrões, supõe-se que eventuais exposições por períodos curtos a concentrações maiores sejam contrabalançadas por determinados períodos de baixa exposição, para esta exposição

intermitente são adotados valores teto, que correspondem as concentrações que não devem ser ultrapassadas.^{11,12}

As ações em saúde do trabalhador encontram-se no atual modelo de Estado brasileiro, dispersas em diversos órgãos como Ministério da Saúde (MS), do Trabalho e Emprego (MTE), e da Previdência e Assistência Social (MPAS). A competência de estabelecer normas sobre a aplicação dos conceitos legais, bem como coordenar, orientar, controlar e supervisionar a fiscalização das mesmas é do Ministério do Trabalho e Emprego através do Departamento de Medicina do Trabalho, que criou as Normas Regulamentadoras (NR) de Segurança e Medicina do Trabalho (Portaria nº 3214 de 08/06/1978). Dentre as normas Regulamentadoras de Segurança e Saúde do Trabalhador estão NR-7, NR-9 e NR-15.

- NR-7: estabelece a obrigatoriedade da elaboração e implementação, por parte de todos os empregadores e instituições que admitam trabalhadores como empregados, do Programa de Controle Médico de Saúde Ocupacional (PCMSO), com o objetivo de promoção e preservação da saúde do conjunto dos seus trabalhadores;
- NR-9: estabelece a obrigatoriedade da elaboração e implementação, por parte de todos os empregados e instituições que admitam trabalhadores como empregados, do Programa de Prevenção de Riscos Ambientais (PPRA), visando preservação da saúde e da integridade dos trabalhadores, através da antecipação, reconhecimento, avaliação e conseqüente controle da ocorrência de riscos ambientais existentes ou que venham a existir no ambiente de trabalho, tendo em consideração a proteção do meio ambiente e dos recursos naturais;
- NR-15: apresenta as atividades ou operações insalubres, estabelecendo limite de tolerância de exposição para diversos agentes (concentração ou intensidade máxima ou mínima relacionada com a natureza e o tempo de exposição ao agente, que causará dano à saúde do trabalhador, durante a sua vida laboral).

A Fundacentro é um órgão vinculado ao Ministério do Trabalho e Emprego, que tem como objetivos o desenvolvimento de estudos, pesquisa e educação na área de segurança e saúde do trabalhador. Presta apoio técnico e científico para ações do Ministério do Trabalho e Emprego, Ministério Público, Ministério da Saúde, dentre outros Ministérios, Programas de Saúde do Trabalhador, Secretarias Estaduais e Municipais, sindicatos e organizações de trabalhadores e empregadores. Trabalha integrada à Secretaria de Segurança e Saúde no Trabalho, constituindo-se hoje em um dos centros colaboradores da Organização Mundial de Saúde em segurança e saúde no trabalho, mantendo também convênios com a Organização Internacional do Trabalho.^{10,13}

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica corresponde aos principais assuntos abordados neste estudo, estando subdividida em quatro partes: histórico do processo de incineração, aplicação deste ao tratamento de RSS, análise de metais emitidos pelo processo e risco a exposição ocupacional a metais. Na primeira parte, é apresentado um panorama geral do processo de incineração, incluindo sua evolução no Brasil e no mundo. Na segunda parte, são apresentados aspectos gerais do processo de incineração como forma de tratamento de RSS e emissão de metais pelo mesmo. Na terceira parte, são apresentados assuntos envolvendo a análise de metais provenientes do processo, incluindo desde a amostragem até as técnicas de determinação. Na última parte da revisão, são apresentados aspectos toxicológicos dos metais no organismo humano.

2.1. A evolução do processo de incineração

2.1.1. No Brasil

O primeiro incinerador municipal no Brasil foi instalado em 1896 em Manaus para processar 60 toneladas por dia de lixo doméstico, tendo sido desativado somente em 1958 por problemas de manutenção. Um equipamento similar foi instalado em 1900 em Belém e desativado em 1978 pelos mesmos motivos.

Em 1913, foi instalado em São Paulo, no bairro de Araçá, um incinerador com capacidade de 40 toneladas por dia. Este antigo incinerador utilizava a queima de lenha para manter a temperatura de combustão do lixo e a alimentação do forno era realizada

manualmente. O incinerador do Araçá operou por 27 anos, até 1940. Ele foi demolido por não conseguir tratar a quantidade de lixo gerada e ter ficado muito próximo de residências.¹

Em 1949 foi instalado o incinerador de Pinheiros, com tecnologia da empresa americana, Nichols Engineering Corporation, que operava 200 toneladas de lixo por dia, em regime de bateladas. Os incineradores que operam neste regime, ao contrário dos incineradores de regime contínuo, queimam quantidades fixas de lixo e somente recebem uma nova quantidade de lixo quando a batelada anterior está totalmente incinerada, sendo dotado de um sistema rotativo vertical, denominado pião, para homogeneizar o lixo e assim conseguir uma combustão completa. O incinerador de Pinheiros operou por 41 anos, até janeiro de 1990.

Dois outros incineradores foram também instalados em São Paulo, ambos com capacidade de 300 toneladas por dia. Em 1959, foi instalado o incinerador da Ponte Pequena e em 1968 o da Vergueiro. O incinerador da Ponte Pequena foi desativado em dezembro de 1997. Logo, em operação restou apenas o incinerador da Vergueiro que processava cerca de 80 toneladas de resíduos de serviços de saúde (RSS) por dia, que eram misturados a uma pequena fração de lixo domiciliar para o controle da temperatura do forno, mantendo-a a, aproximadamente, 900°C, evitando danos ao material refratário da parte interna da câmara de combustão. Em março de 2002, este incinerador foi desativado por problemas técnicos considerados irreversíveis, os quais ocasionavam deficiência no processo de combustão.

Os equipamentos mencionados acima contaram com tecnologias de gerações hoje ultrapassadas, não tendo a capacidade de atender as exigências das leis ambientais atuais, sendo esta mais uma razão para sua desativação.

O resíduo que restou na usina da Vergueiro foi incinerado por empresa particular, situada na cidade de Mauá, a qual continua prestando este serviço à prefeitura, assim como outras usinas localizadas em regiões mais afastadas do centro urbano.

Como nos últimos anos tem aumentado a preocupação com a poluição ambiental, os incineradores atuais são providos de equipamentos de controle da poluição mais eficientes, tais como lavadores de gases, os quais substituíram as câmaras de sedimentação dentre outros processos mais simples de controle da emissão do processo de combustão.

Em paralelo, iniciou-se, em 1970, a fase de implantação de incineradores especificamente desenvolvidos para o tratamento de resíduos especiais, como: aeroportuários, hospitalares, industriais e outros perigosos. Nesta fase, entre outros, foram instalados os incineradores das indústrias químicas Ciba, Basf, Hoescht (atual Clariant), Bayer, Cetrel, Cinal e da Kompac no aeroportos internacionais de Guarulhos e no do Rio de Janeiro, no Banco Central, e em várias Prefeituras, como a de Brasília, além do mais recente Centro de Tratamento de Resíduos Perigosos, instalado em Fortaleza, que acaba de ter os testes de emissão de gases aprovados segundo as normas ABNT e Cetesb. Alguns destes incineradores estão listados na Tabela 2, com suas características principais. Esta não tem por objetivo ser exaustiva, nem incluir todos os incineradores existentes, mas apenas dar uma visão de algumas instalações importantes, que se mantêm em funcionamento no momento. Estes incineradores têm capacidades de processar entre 300 kg/hora a 1,8 t/hora. Dados levantados pela Cetesb afirmam que o Brasil gera cerca de 2,7 milhões de toneladas de resíduos perigosos, entretanto, muitos técnicos afirmam que o valor real deve ser várias vezes superior a este, considerando-se as dificuldades em se realizar o levantamentos precisos da geração destes resíduos, e mais ainda complexo é o conhecimento dos resíduos estocados, considerados passivos ambientais.¹⁴

Tabela 2: Características de alguns dos principais incineradores instalados no Brasil

Planta	Projeto/ Tecnologia	Tipo	Capacidade t/ano	Resíduos processados	Tratamento de gases	Controle de emissões	Efluentes e cinzas
BASF Guaratinguetá – SP	Inter-Uhde	Rotativo	2.700	R.S.L.P., exceção de ascaréis	Lavadores ácido e alcalino	Contínuo: O ₂ , CO e SO _x .	Cinzas: em aterro terceirizado
BAYER Belfort Roxo – RJ	Inter-Uhde	Rotativo	3.200	R.S.L.P., incluindo Difenilas policloradas	Lavadores ácido e alcalino, separador de gotículas	Contínuo: O ₂ CO.	Cinzas: aterro ind.próprio. Líquidos: ETE
CIBA Taboão da Serra – SP	Inter-Uhde	Rotativo	3200	Res. ind. org. e inorg. Exc. ascarel e radioativos.	Lavadores ácido e alcalino, demister e ciclone	Contínuo: NO _x , SO _x , O ₂ , CO, temperatura, vazão, MP	Aterro próprio para 10.000 m ³ de cinzas e escórias.
CLARIANT Suzano – SP ISO 14.001	Inter-Uhde	Rotativo	2.700	Resíduos sólidos e pastosos	Lavadores ácido e alcalino	Contínuo: CO, CO ₂ , O ₂ , NO _x , SO _x , MP	Cinzas e escórias: aterro industrial em Resende (RJ) e ETE 300 m ³ /h
KOMPAC Fortaleza – Ceará	Kompac	Câmara horizontal c/leito reciprocante	10.950	Resíduos de serviços de Saúde e Industriais	Lavadores ácido e alcalino	Contínuo: CO ₂ , CO, O ₂ Periódico: SO _x , NO _x , HCl, HF, Cl ₂	Efl. líquidos não descartados. Cinzas e escórias: aterro industrial
RHODIA (Cubatão – SP)	Rhone- Poulanc	Rotativo	18.000	R.S.L.P., incluindo, organoclorados	Lavadores ácido e alcalino	Contínuo: O ₂ , CO, CO ₂ e NO _x	Aterro industrial classe I
SILCON Paulínea – SP	Hoval	Leito fixo, pirolítico	3.600	Resíduos de serviços de Saúde	Lavadores ácido e alcalino	Contínuo: O ₂ , CO, CO ₂ e NO _x	Aterro industrial classe I

2.1.2. No mundo

Para seguir adiante na análise da incineração no Brasil, é importante conhecer um pouco da evolução do processo, que pode ser caracterizada através de gerações ou estágios de desenvolvimento das plantas de incineração (Menezes, 1999).

- 1ª Geração - 1950 -1965

Anteriormente a 1950 as plantas existentes eram demasiadamente incipientes caracterizando-se como um primeiro estágio de evolução àquelas instaladas de 1950 a 1965. Nesta fase, a função única era ainda a de reduzir o volume o lixo. Os gases eram descarregados diretamente na atmosfera sem tratamento algum. E, a seguir, as primeiras torres de água de refrigeração foram instaladas sobre a câmara de combustão. A concentração de poeira atingia níveis de 1000 mg m^{-3} (os sistemas modernos atuais atingem até 3 mg m^{-3}). As principais plantas desta geração foram as de Lousanne (1959), Berna (1954), Bruxelas (1957) -Von Roll.

- 2ª Geração - 1965 – 1975

Nesta época aparecem os primeiros sistemas de proteção do meio ambiente, que reduziram as emissões a 100 mg m^{-3} . Bem como os incineradores com câmara dupla, cujo objetivo era melhorar a eficiência de queima. Surgem os primeiros interesses em recuperação de calor para a geração de energia e as plantas de grande capacidade.

- 3ª Geração - 1975 - 1990

A fase de 75 a 90, é caracterizada, no mundo desenvolvido, pelo aumento da capacidade energética e desenvolvimento das normas de proteção ambiental. O público começa a estar mais atento aos problemas de poluição. Nesta época ocorre a introdução dos sistemas complexos de lavagem de gases para reduzir as emissões de gases ácidos, com a neutralização de HCl, SOx, HF e metais pesados. As caldeiras foram aprimoradas e ocorreu a melhoria nos processos de combustão dos orgânicos. A automação passa a ser centralizada. Multiplicam-se os centros de tratamento com co-geração de energia.

- 4ª Geração - 1990 - atual

Ampliam-se as pressões dos movimentos verdes. O tratamento de gases é sofisticado ainda mais, perseguindo a meta de emissão Zero. Avançam os sistemas para a remoção de outros poluentes como NOx, dioxinas e furanos. Ocorre o aparecimento das tecnologias avançadas de tratamento para a produção de resíduos finais inertes, tal como o uso do plasma térmico. Estes resíduos podem ser reciclados ou dispostos sem nenhum problema para o meio ambiente. Vários processos estão se sofisticando atualmente no pré-tratamento do lixo, anterior à incineração, para aumentar a sua homogeneização, baixar a umidade e melhorar o poder calorífico, de tal forma a transformá-lo em um combustível de qualidade para a máxima geração de energia. Sofisticam-se também os processos de combustão com o aumento dos sistemas de turbilhonamento, secagem, ignição e controle da combustão.¹⁴

Figura 1: Esquema da evolução de uma planta dos anos 50 para os anos 90

2.1.3. Vantagens e desvantagens do processo de incineração de resíduos

O manejo de resíduos urbanos e especiais é um problema crescente no mundo inteiro. Na União Européia, ao mesmo tempo em que a produção de lixo aumenta continuamente, são elaboradas normas mais rigorosas sobre a quantidade de resíduos que podem ir a aterros sanitários. Muitos incineradores vêm sendo fechados em função de um maior controle sobre emissões atmosféricas. Na Europa, todos os incineradores em breve terão que se adequar a uma nova diretiva.

Felizmente, há soluções de longo prazo para a crise do lixo, destacando-se a implementação de estratégias de prevenção de resíduos e, ao mesmo tempo, de reutilização e reciclagem. Há, porém, uma tendência cada vez maior de se construir e planejar novos incineradores, numa tentativa de fornecer uma solução rápida para a crise do lixo. Nesse sentido, o processo de incineração é aparentemente adequado, pois tem-se a falsa idéia de que reduzem o lixo a um décimo do volume original, reduzindo, assim, o volume de resíduos destinados a aterros sanitários.

Os incineradores, no entanto, são um tema controverso, tendo em vista os potenciais impactos ao meio ambiente e a saúde humana e as considerações econômicas que não favorecem essa tecnologia. Sabe-se que ocorre a emissão de inúmeros compostos tóxicos na atmosfera e a produção cinzas e outros resíduos. O governo das Filipinas, por exemplo, já tomou real consciência das muitas questões preocupantes ligadas à incineração. Após forte pressão pública, a regulamentação de 1999 *Philippine Clean Air Act* banuiu a incineração de resíduos urbanos, médicos e perigosos. Em troca, está-se promovendo a redução, reutilização e reciclagem do lixo, ao mesmo tempo em que tecnologias não incineradoras estão sendo recomendadas para resíduos que requerem alguma forma de tratamento. Enquanto isso, no entanto, países europeus estão defendendo a construção de mais incineradores.

Estudos sobre incineradores e suas emissões e os impactos que causam sobre a saúde humana revelaram uma ampla gama de efeitos na saúde que foram associados à residência próxima a incineradores, assim como ao trabalho nos mesmos. Esses efeitos incluem câncer (em crianças e adultos), impactos adversos no sistema respiratório, doenças cardíacas, efeitos no sistema imunológico, aumento na incidência de alergias e anormalidades congênitas. Alguns estudos, especialmente os sobre câncer, estão relacionados a incineradores mais antigos, e não aos modernos. No entanto, os incineradores modernos em operação nos últimos anos também foram associados a efeitos adversos na saúde.

Apesar da redução de alguns compostos nas emissões de chaminés, os incineradores modernos também emitem inúmeras substâncias tóxicas lançadas na atmosfera ou misturadas com outros resíduos como a cinza volante e a cinza de fundo.

Além disso, a redução dos níveis de dioxinas e de outros compostos nos gases de chaminé está levando ao aumento das emissões desses mesmos compostos nos outros resíduos dos incineradores.

Na maioria dos casos, os efeitos na saúde associados aos incineradores não podem ser atribuídos a um poluente específico. Devido à limitação de dados disponíveis, é impossível prever os efeitos na saúde causados pelos incineradores, incluindo as plantas novas ou aquelas que sofreram reformas. Em face disso, deve-se implementar políticas adequadas para o gerenciamento de resíduos, tendo por base a minimização da geração.¹⁵

2.2. Considerações gerais sobre o processo de incineração

A incineração é um processo de tratamento que se baseia na decomposição térmica via oxidação, com o objetivo de minimizar a toxicidade e o volume dos resíduos. Logo, este processo promove a decomposição do lixo em altas temperaturas, cerca de 900°C, na presença

de oxigênio, sendo que o volume do lixo pode ser reduzido em até 90%, se o sistema for eficiente e estiver operando nas condições ideais.

Há necessidade de se controlar a combustão, pois a combustão incompleta pode aumentar os níveis de gases de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x) e enxofre (SO_x), material particulado, substâncias orgânicas poluentes como hidrocarbonetos policíclicos aromáticos e dioxinas, ácido clorídrico, ácido fluorídrico, metais como mercúrio, cádmio, dentre outros.¹⁶

Dentre os tipos de resíduos que apresentam maior adequabilidade ao processo de incineração, incluem-se: resíduos orgânicos constituídos basicamente de carbono, hidrogênio e/ou oxigênio; resíduos que contêm carbono, hidrogênio, cloro com teor inferior a 30% em peso e/ou oxigênio e resíduos que apresentam seu poder calorífico inferior (PCI) maior que 4700kcal/kg, não necessitando, portanto de combustível auxiliar para queima.

As características dos resíduos e seu comportamento durante a combustão determinam como devem ser misturados, estocados e introduzidos na zona de queima, dependendo da constituição do efluente gasoso gerado, o sistema deve ser provido de um equipamento de controle de poluição eficiente para evitar a contaminação ambiental.

O processo de incineração deve ser visto como um conjunto de cinco sistemas, os quais têm como função: preparação do resíduo para queima, combustão do resíduo, tratamento de gases de saída, tratamento de efluentes líquidos e acondicionamento e disposição dos resíduos sólidos gerados no processo de queima e nos equipamentos de controle de poluição do ar.

Uma usina de incineração de lixo é composta por: ¹⁶

- Área de recebimento de lixo, com balança, fosso, dispositivo para alimentação do forno, sistema de exaustão no fosso para evitar odores na vizinhança;
- Unidade de queima com sistemas de grelhas de tipos diferentes, fornos tubulares rotativos, fornos de leito fluidizado, dentre outros;
- Pós-queimadores, que os incineradores modernos têm acoplado a eles para melhorar a eficiência da combustão;
- Sistema de purificação de ar, assim como tratamento ou disposição do material captado através dos sistemas de purificação;
- Sistema de recolhimento, transporte e destinação da escória gerada;
- Sistema de transformação de calor em energia elétrica, se o incinerador for energético.

O sistema de purificação de ar é composto basicamente por: ¹⁶

- Processos de desempoeiramento com filtros eletrostáticos, ciclones dentre outros;
- Sistemas de lavagem de gases através de banhos alcalinos;
- Filtros de carvão ativo para reter substâncias orgânicas;
- Catalisadores para desnitrificação e destruição das dioxinas;
- Chaminé.

Os produtos e restos da incineração a serem tratados são: ¹⁶

- Chorume proveniente do fosso de lixo;
- Poeiras captadas através do sistema de desempoeiramento como filtros eletrostáticos e ciclones;
- Águas do sistema de lavagem de gases;
- Escória, resíduo que não foi destruído durante a queima.

A figura 2 apresenta o esquema de um sistema completo de incineração, com os seus componentes, cuja combinação apropriada depende das propriedades físicas e químicas do resíduo a ser incinerado.¹⁶

Figura 2: Esquema do processo de incineração

Das etapas apresentadas na figura 2, a mais importante é a combustão, onde através da oxidação térmica ocorre a desinfecção dos resíduos. O agente oxidante é o ar atmosférico e o processo de combustão é controlado por meio de três variáveis principais que são a temperatura, a turbulência e o tempo de residência. A temperatura representa a quantidade de energia fornecida ao resíduo para que ocorra quebra e recombinação de moléculas existentes. A turbulência indica o grau de mistura do resíduo com o oxigênio. O tempo de residência é o tempo no qual as substâncias permanecem na temperatura adequada, tempo este disponível para que as reações de oxidação ocorram.^{16,18}

2.2.1. Presença de metais no processo de incineração de RSS

Os metais estão presentes nos resíduos de serviços de saúde (RSS), sendo estes constituídos por objetos metálicos perfuro-cortantes em contato direto com material biológico infectante, além de seringas e materiais infectantes em geral utilizados em hospitais e estabelecimentos prestadores deste tipo de serviço, como mencionado anteriormente.

A forma de tratamento mais simples para os RSS é através do processo de combustão controlada, minimizando sua toxicidade, sua patogenicidade e seu volume.

A presença de metais nos resíduos a serem incinerados é uma preocupação, pois este processo provoca a partição do metal presente nos resíduos de alimentação da câmara de combustão, podendo ocorrer sua emissão juntamente com as cinzas, ou com os resíduos do sistema de controle de poluição ou, até mesmo, através da chaminé dependendo de sua volatilidade.

A porção inorgânica dos resíduos contém a maior parte dos metais e seus compostos, portanto, esta não pode ser destruída pelo processo de incineração, formando cinzas e escória. Uma pequena fração das cinzas é carregada pelos gases de combustão e são captadas pelo sistema de controle de poluição do ar. Algumas espécies metálicas são voláteis e vaporizam durante o processo.

Metais e seus compostos vaporizados podem condensar homogeneamente, promovendo a formação de fumos finos, ou podem condensar heterogeneamente como material particulado carregado pelo efluente gasoso. Sob outro mecanismo, constituintes metálicos podem formar novos compostos que não estavam presentes no resíduo de alimentação do processo, tais como cloretos, fluoretos, óxidos metálicos e, até mesmo espécies reduzidas, que podem apresentar maior volatilidade.

A Agência de Proteção ao Meio Ambiente dos Estados Unidos (USEPA) está desenvolvendo um modelo, baseado na temperatura de volatilização dos metais e seus compostos, para auxiliar na previsão da distribuição relativa dos traços de metais nas emissões e descargas dos incineradores.

Até recentemente, os dados sobre o comportamento de metais no processo de incineração de resíduos perigosos eram bem limitados, pois o enfoque dos estudos centrava-se na emissão de poluentes orgânicos. Nos últimos anos, contudo, o conhecimento sobre a incineração de resíduos contendo metais tem se expandido significativamente. Diversos estudos patrocinados pela USEPA têm examinado a partição de metais e as eficiências dos sistemas de controle da poluição do ar.

Neste contexto, a avaliação do teor de metais detectada nos pontos de emissão do incinerador é de extrema importância, pois podem constituir um risco ao meio ambiente e à saúde dos trabalhadores, dada sua toxicidade.¹⁹

Segundo a USEPA, os metais que devem ser avaliados estão relacionados na Tabela 3 de acordo com sua toxicidade:

Tabela 3: Concentrações de referência no ar segundo EPA¹⁹

<i>Metais carcinogênicos</i>	<i>Metais tóxicos não carcinogênicos</i>
Cd = 0,0056 mg m ⁻³	Ba = 50,00 mg m ⁻³
Be = 0,0042 mg m ⁻³	Ni = 20,00 mg m ⁻³
As = 0,0023 mg m ⁻³	Se = 4,00 mg m ⁻³
Cr = 0,00083 mg m ⁻³	Ag = 3,00 mg m ⁻³
	Tl = 0,50 mg m ⁻³
	Sb = 0,30 mg m ⁻³
	Pb = 0,09 mg m ⁻³
	Hg = 0,08 mg m ⁻³

Os metais podem ser encontrados no processo de incineração na fumaça emitida pela chaminé; no material particulado do sistema de desempoeiramento e nas cinzas ou escória, os quais podem proporcionar risco à saúde do trabalhador e ao meio ambiente.²⁰

Como não é possível determinar a constituição dos resíduos de serviços de saúde, dada sua grande heterogeneidade e patogenicidade, a Tabela 4 apresenta as prováveis fontes destes elementos em materiais incinerados, provenientes dos estabelecimentos deste setor.

Tabela 4: Prováveis fontes de emissão dos metais avaliados ⁽²¹⁾

Metal	Material no qual está inserido	Forma
Antimônio	<ul style="list-style-type: none"> - Remédio contra tosse - Detector infra-vermelho - Maçaneta - Acumulador - Solda 	<ul style="list-style-type: none"> - Compostos - Compostos - Liga - Liga - Liga
Arsênio	<ul style="list-style-type: none"> - Medicamentos - Diodos emissores de luz - Vidro, laser - Metal para espelho 	<ul style="list-style-type: none"> - Compostos - Compostos - Compostos - Liga
Bário	<ul style="list-style-type: none"> - Lâmpadas fluorescentes - Chapas do estômago - Pigmento para papel - Tubo de vácuo 	<ul style="list-style-type: none"> - Compostos - Compostos - Compostos - Liga
Berílio	<ul style="list-style-type: none"> - Janela para tubo de raio X - Molas (para instrumentos) - Ligas utilizadas em próteses dentárias 	<ul style="list-style-type: none"> - Estado natural - Liga - Liga
Cádmio	<ul style="list-style-type: none"> - Bateria recarregável - Proteção anticorrosiva para parafusos e porcas - Pigmento vermelho-amarelo - Fotômetros 	<ul style="list-style-type: none"> - Estado natural - Estado natural - Compostos - Compostos
Chumbo	<ul style="list-style-type: none"> - Proteção contra radiação - Secante para tintas - Acumulador 	<ul style="list-style-type: none"> - Estado natural - Compostos - Compostos
Cobre	<ul style="list-style-type: none"> - Arame, cabo elétrico, circuitos impressos - Painéis - Caldeira, tubos e registros 	<ul style="list-style-type: none"> - Estado natural - Liga - Liga
Crômio	<ul style="list-style-type: none"> - Proteção de superfícies metálicas - Aço, ferramentas - Fita cassete e vídeo - Tinta laser 	<ul style="list-style-type: none"> - Estado natural - Liga - Compostos - Compostos
Mercúrio	<ul style="list-style-type: none"> - Barômetro, termômetro - Iluminação - Luz terapêutica, baterias - Odontologia - Desinfetantes 	<ul style="list-style-type: none"> - Estado natural - Estado natural - Estado natural - Liga - Compostos
Níquel	<ul style="list-style-type: none"> - Bateria carregável - Talheres - Ouro branco 	<ul style="list-style-type: none"> - Compostos - Liga - Liga
Prata	<ul style="list-style-type: none"> - Vidro corante - Talheres - Papel fotográfico, filme 	<ul style="list-style-type: none"> - Compostos - Liga - Compostos
Selênio	<ul style="list-style-type: none"> - Fotômetro - Corante para vidro vermelho - Xampu anti-caspa 	<ul style="list-style-type: none"> - Estado natural - Compostos - Compostos
Tálio	<ul style="list-style-type: none"> - Enchimento para termômetro - Vidro com baixo ponto de amolecimento - Detector infra-vermelho - Exame de músculos do coração - Vermífugo 	<ul style="list-style-type: none"> - Liga - Compostos - Compostos - Compostos - Compostos

2.3. Análise de metais emitidos pelo processo

2.3.1. Amostragem

Considerando que os metais, presentes nos resíduos incinerados, normalmente condensam formando partículas sólidas após a queima, a avaliação do risco ocupacional causado pela inalação deste material potencialmente tóxico, usualmente requer a caracterização das partículas através da quantificação de seus constituintes em massa por volume de ar do ambiente de trabalho amostrado.

As primeiras recomendações para a avaliação de material particulado em ambientes de trabalho levavam em consideração o tamanho das partículas, classificando-as em partículas inaláveis, menores que $10\mu\text{m}$ e partículas totais, compostas por todo o material particulado suspenso no ar.

A definição da fração inalável para material particulado suspenso no ar foi originalmente recomendada pelo British Medical Research Council em 1952, e internacionalmente adotada em 1959 durante a “Johannesburg Pneumoconiosis Conference”. A partir daí, dispositivos seletores, conhecidos como ciclones, foram desenvolvidos para separar as partículas menores que $10\mu\text{m}$, consideradas como as causadoras das pneumoconioses, atualmente conta-se com filtros de porosidades e constituições diversas, tais como éster celulose e PVC.

Definições mais abrangentes passaram a serem necessárias para explicar doenças como câncer nasal e bronquial e bronquite crônica, causadas por partículas que se depositam nas vias aéreas superiores e região traqueobronquial.

Nos últimos 20 anos, vários estudos foram realizados para quantificar a fração de partículas suspensas no ar que realmente entram no sistema respiratório, procurando

estabelecer uma analogia direta dos instrumentos de amostragem com o que acontece durante a inalação humana, concluindo-se que partículas maiores que 100 μm possuem pequena probabilidade de penetração no sistema respiratório.

Para melhor compreensão das frações estabelecidas por convenção, o trato respiratório foi dividido, como mostra a tabela 5, em regiões consideradas bases anatômicas para identificação das frações de partículas relevantes. As especificações para construção de instrumentos de amostragem e definição de limites de exposição para amostragens por seleção de tamanho de partícula também são baseadas nessa referência.

Tabela 5: Divisão do trato respiratório em bases anatômicas de referência segundo o mecanismo de deposição das partículas

Região	Estruturas anatômicas	Localização	Doenças relacionadas
1. Vias Aéreas Superiores	Nariz Boca Nasofaringe Orofaringe Laringofaringe Laringe	Extratorácica	Irritação do septo nasal, faringe e laringe Câncer de faringe e laringe
2. Região Traqueobronquial	Traquéia Brônquios Bronquíolos (bronquíolos terminais)	Torácica (pulmonar)	Broncoconstrição Bronquite crônica Câncer bronquial
3. Região de Troca de Gases	Bronquíolos respiratórios Dutos alveolares Sacos alveolares Alvéolos	Alveolar	Pneumoconioses Enfisema Alveolite Câncer pulmonar

Os amostradores devem coletar as frações inalável, torácica e respirável, que incluem partículas que penetram nas vias aéreas superiores, pulmões e região alveolar dos mesmos, respectivamente, conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3: Representação esquemática das principais regiões do trato respiratório e sua correspondência com as frações inalável, torácica e respirável

Não só o tamanho das partículas deve ser levado em consideração, sua constituição é de extrema importância uma vez que, os metais no processo de incineração, como visto anteriormente, constituem parte do material particulado suspenso no ambiente ocupacional de usinas de incineração de resíduos de serviços de saúde.²²

Os instrumentos de amostragem são o meio pelo qual o particulado pode ser coletado, sendo constituído basicamente por uma bomba de amostragem conectada a um determinado filtro cuja porosidade deve ser adequada à dimensão do particulado.

Um problema paralelo a emissão de material particulado é a emissão de vapores contendo mercúrio, pois o mercúrio, presente nos resíduos incinerados normalmente é emitido pelo processo em sua forma elementar, estando o trabalhador exposto a vapores tóxicos

contendo este elemento. Para a amostragem deste elemento, não é possível a utilização de filtros, logo, substituem-se estes por resinas adsorvedoras deste elemento. Uma resina utilizada para a amostragem de mercúrio metálico presente no ar é a hopcalite, constituída de óxido de cobre e manganês (CuMn_2O_4). Segundo estudos sobre a ação catalítica da hopcalite, esta resina apresenta sítios ativos capazes de oxidar o mercúrio elementar presente no ar, através da reação de oxi-redução entre íons cobre (II) e manganês (III), a qual gera zonas oxidantes as quais captam o mercúrio elementar gerando óxido de mercúrio (II) que fica retido dentro do tubo juntamente com a resina, de acordo com a reação 1 representada abaixo.

23,24

2.3.2. Preparação de amostras assistida por radiação de microondas

A solubilização da amostra é uma etapa importante na determinação de elementos maiores, menores e em níveis de traços em material particulado, pois promove a disponibilização dos analitos para posterior análise.

Uma alternativa que torna este processo mais rápido é a solubilização assistida por radiação de microondas, a qual apresenta maior confiabilidade e exatidão em relação aos métodos convencionais, com maior eficiência e menor tempo.

Microondas é uma forma de energia eletromagnética não ionizante, que causa movimentos moleculares através da migração dos íons e/ou rotação de dipolos sem, contudo, causar mudanças nas estruturas moleculares. A energia de microondas está situada dentro do espectro eletromagnético entre as frequências de 300 a 300.000 MHz, sendo que a mais

utilizada em instrumentos de laboratório é a frequência de 2450 MHz com comprimento de onda de 12,2 cm.

Tipicamente, a energia de microondas é transformada em energia térmica através de dois mecanismos: condução iônica e rotação de dipolo. Em muitas aplicações práticas, estes dois fenômenos ocorrem simultaneamente. Na condução iônica, soluções líquidas constituídas de ácidos minerais ou sais, contém íons que são condutores de corrente elétrica. Na presença de um campo elétrico de energia de microondas, estes íons migrarão alinhando-se ao campo elétrico. Este campo muda de polaridade em um número elevado de vezes a cada segundo, forçando os íons a mudarem de direção também muitas vezes por segundo. Durante a migração, ocorrerão colisões entre estes íons solvatados com moléculas vizinhas, aumentando a energia cinética e, conseqüentemente, a temperatura da solução.

A rotação de dipolo ocorre quando moléculas que possuem dipolos elétricos permanentes como a água, na presença de um campo elétrico de energia de microondas, irão alinhar-se ou rotacionar em resposta a este campo. Esta rotação causará colisões com moléculas vizinhas, provocando um aumento na energia cinética e, conseqüentemente, o aumento da temperatura da solução. A oscilação do campo elétrico da energia de microondas causará, portanto, muitas colisões provocando um rápido aumento da temperatura. A rotação de molécula com dipolo permanente é dependente da viscosidade. Como o líquido aquece, sua viscosidade diminui, aumentando desta maneira a absorção de energia de microondas.^{25,26}

2.3.3. Técnicas de determinação

Neste estudo, a determinação de metais pesados foi efetuada utilizando a técnica de espectrometria de emissão atômica com fonte de plasma de argônio induzido (ICP-OES) para todos os constituintes metálicos, com exceção do mercúrio, para o qual aplicou-se a

espectrometria de absorção atômica com geração de vapor frio, ou seja, técnicas reconhecidas adequadas a determinação de metais em amostras de material particulado, as quais constam da metodologia da NIOSH 7300 e 6009 respectivamente.²⁷

2.3.3.1 Fundamentos da espectrometria de emissão atômica com plasma de argônio induzido

O plasma é um gás parcialmente ionizado onde co-existem elétrons livres e íons positivos em movimento, em um processo onde ocorre transferência de energia por mecanismo colisional. Em um plasma de argônio, freqüentemente empregado para análises por emissão, os íons argônio e elétrons são as principais espécies presentes, embora os cátions da amostra também estejam presentes em menores quantidades. A ionização parcial do gás argônio uma vez iniciada, é sustentada por radiofrequência e a temperatura pode chegar a 10.000 K.

No processo indutivo do ICP, os elétrons recebem energia do campo magnético induzido, produzido numa bobina energizada por uma fonte de alta radiofrequência. Quando se energiza uma bobina tipo solenóide, o campo magnético induzido apresenta linhas distribuídas de forma homogênea, no sentido do eixo da espiral. Como a corrente é produzida por fonte de radiofrequência, o campo formado é oscilante, mudando o sentido dependendo da frequência. No caso de 27,12 MHz têm-se $27,12 \times 10^6$ ciclos por segundo.

A fonte de emissão típica de plasma indutivamente acoplado, chamada de tocha, consiste em três tubos concêntricos com entradas independentes para cada seção anular. Na seção anular externa, o gás é introduzido tangencialmente, com fluxo superior a 12 litros por minuto, usado como gás de resfriamento, sendo que a bobina de indução é refrigerada a água. Na seção anular intermediária entra o gás auxiliar, a uma vazão de aproximadamente 1 litro

por minuto, usado para resfriar as paredes internas do tubo central e centralizar radialmente o plasma. Na seção interna ou tubo injetor, entra o aerossol da amostra, por arraste juntamente com o gás em vazões de aproximadamente 1 litro por minuto.

A introdução de amostra geralmente é realizada por um nebulizador para a formação de um aerossol gás/líquido. A formação do aerossol, a seleção de porção homogênea de gotas e, a condução para o plasma é de extrema importância para a obtenção de bons resultados. Entre as propriedades do aerossol são importantes: o tamanho e a distribuição das gotículas, as quantidades de amostra e solvente transferidas para o plasma e as flutuações do sistema de nebulização. A qualidade do aerossol produzido depende do nebulizador, enquanto que a seleção da parte do aerossol transferido para o plasma depende da câmara de nebulização.

O tipo mais comum de nebulizador é o pneumático de tubo concêntrico, mostrado na figura 4, no qual a amostra líquida é aspirada através de um tubo capilar por um fluxo de gás em torno da extremidade deste tubo, promovendo a formação de um aerossol, cujas gotículas são levadas a uma câmara de nebulização, a qual separará gotículas de até 2 μm que são conduzidas ao plasma.^{29,30}

Figura 4: Nebulizador pneumático de tubo concêntrico³¹

Como o plasma acoplado indutivamente atinge temperaturas maiores em relação às chamas de combustão comuns, este promove a excitação da maioria dos elementos constituintes das amostras, gerando a radiação proveniente da emissão atômica destes elementos, a qual é proporcional a sua concentração. Para a detecção e medição desta radiação acopla-se a tocha um sistema espectrométrico eficiente, que permita a medição em uma ampla região espectral com um máximo de sensibilidade e resolução.

A temperatura, estabilidade e a característica inerte do gás argônio da tocha eliminam a maior parte das interferências espectrais encontradas nas chamas de combustão, promovendo maior sensibilidade decorrentes da obtenção de baixos limites de detecção, o que explica a grande aplicabilidade desta técnica analítica.

2.3.3.2 Princípios da técnica de espectrometria de absorção atômica com geração de vapor frio de mercúrio

Na geração de vapor frio acoplada a absorção atômica, o mercúrio é quimicamente reduzido ao estado atômico livre pela reação da amostra com um agente redutor, tal como cloreto de estanho (II) ou borohidreto de sódio em um sistema fechado de reação. O mercúrio livre volátil é então carregado do sistema mencionado por borbulhamento de ar, argônio ou nitrogênio na solução redutora. Os átomos são carregados pelo fluxo de gás até a célula de absorção, a qual é colocada no caminho ótico do espectrômetro de absorção atômica. Algumas vezes, aquece-se levemente a célula para evitar umidade na sua parte interna.

O mercúrio elementar gerado pelo sistema de vaporização, ao ser carregado para a célula de absorção, absorve radiação em um determinado comprimento de onda proveniente de uma lâmpada de cátodo oco (LCO) ou de descarga sem eletrodo (EDL). Para medir esta

absorção de luz com o máximo de sensibilidade, é necessário o uso de uma fonte que emita o comprimento de onda característico capaz de ser absorvido pelos átomos.³²

Como os átomos de mercúrio são carregados para o interior da célula de amostragem, a absorbância medida aumenta indicando o aumento da concentração de átomos de mercúrio no caminho ótico. Alguns sistemas permitem a passagem direta através da célula de absorção, nestes casos, considera-se o maior sinal de absorbância atingido durante a leitura da amostra, o qual diminui quando os átomos de mercúrio são eliminados da célula de absorção pela passagem de gás inerte. Em outros sistemas, um volume definido da amostra é retido em um *loop* fechado e, então, carregado para o sistema de reação que gerará os átomos de mercúrio, os quais seguirão para a célula de absorbância, gerando um sinal analítico transiente. Todo o processo de geração de vapor frio de mercúrio pode ser automatizado utilizando-se técnicas de injeção em fluxo. As amostras podem ser analisadas em duplicata a uma razão de uma amostra por minuto sem intervenção de um operador. Os limites de detecção são comparáveis aos obtidos por processos manuais. O uso de sistemas de injeção em fluxo também minimiza a quantidade de reagentes requeridos na determinação, favorecendo a redução de custos.

A sensibilidade da técnica de geração de vapor frio de mercúrio é muito maior quando comparada ao sistema convencional com uso de chama. Esta sensibilidade é alcançada devido a atomização de 100% do mercúrio presente na amostra, o que não ocorre na chama.

A sensibilidade pode ser favorecida pelo uso de volumes maiores de amostras ou sistemas de injeção em fluxo, sendo que o limite de detecção pode alcançar 0,02 microgramas por litro em condições adequadas.

A técnica de geração de vapor frio é restrita ao mercúrio, pois nenhum outro elemento oferece possibilidade de redução química produzindo átomos livres no estado gasoso a temperatura ambiente.^{33,34}

2.4. Exposição ambiental e humana às emissões de incineradores

As pesquisas sobre contaminação ambiental e exposição humana a poluentes lançados por incineradores são ainda limitadas e têm centrado-se em dioxinas, furanos e metais pesados. Pesquisas demonstram que tanto os incineradores antigos, quanto os modernos podem contribuir para a contaminação do solo e vegetação local por esses poluentes. Da mesma forma, em vários países europeus, o leite proveniente da vizinhança de incineradores contém níveis elevados de dioxinas, em alguns casos acima dos limites legais.^{15,35}

As populações próximas a incineradores estão potencialmente expostas a certos compostos através da inalação do ar ou consumo de produtos agrícolas contaminados (como legumes, ovos e leite). Outra fonte de contaminação é o contato da pele com o solo contaminado. No Reino Unido, na Espanha e no Japão, foram encontrados aumentos significativos nos níveis de dioxinas nos tecidos de indivíduos que moram próximo a incineradores, provavelmente como resultado da exposição. Estudos na Holanda e na Alemanha, no entanto, não apontaram aumentos nos níveis de dioxinas em indivíduos em condições semelhantes. Na Finlândia, foi relatado aumento nos níveis de mercúrio no cabelo de indivíduos que moram nos arredores de um incinerador. As causas mais prováveis para esse aumento são as emissões da planta. Crianças que moram próximo a um incinerador moderno na Espanha apresentaram níveis elevados de tioéteres urinários, um biomarcador de exposição tóxica. Na Alemanha, foram encontrados níveis elevados ou uma frequência maior de certos PCBs no sangue de crianças que moram próximo a um incinerador de resíduos perigosos.⁽¹⁵⁾

Vários estudos apontaram níveis elevados de dioxinas, e/ou certos congêneres de dioxinas, nos tecidos de indivíduos que trabalham em incineradores, tanto nos antigos quanto nos modernos. Acredita-se que isso seja consequência da exposição a cinzas contaminadas no

ambiente de trabalho. Da mesma forma, alguns estudos apontaram um aumento nos níveis de fenóis clorados, chumbo, mercúrio e arsênio nos tecidos dos trabalhadores.^{36,37}

Dados experimentais confirmam que os incineradores liberam substâncias tóxicas e que populações humanas acabam expostas a esses poluentes. Estudos sobre trabalhadores de plantas de incineração e populações próximas a essas plantas apontaram uma série de impactos na saúde. Apesar desses estudos apresentarem forte indicativo da seriedade do problema, o número de científicos nesta área ainda é bastante limitado.³⁸

2.4.1. Aspectos toxicológicos e propriedades dos metais

Antimônio

O antimônio é estável a temperatura ambiente mas, quando aquecido, queima produzindo luminosidade brilhante, liberando fumos brancos densos de trióxido de antimônio. É quimicamente semelhante ao arsênio, formando ligas com este elemento e também com chumbo, estanho, zinco, ferro e bismuto.

Na natureza, o antimônio é encontrado em combinação com diversos elementos, e em minerais como *estibinita*, *valentinita*, *kermesita* e *senarmonita*.

O antimônio de alta pureza é empregado na fabricação de semicondutores, enquanto que o comum é largamente utilizado na produção de ligas, conferindo a estas um aumento no grau de dureza, resistência mecânica, resistência a corrosão e baixo coeficiente de fricção, ligas combinando estanho, chumbo e antimônio são usadas em indústrias de eletricidade. A resistência do antimônio metálico em relação a ácidos e bases justifica sua larga utilização em indústrias de produtos químicos.

Os riscos de intoxicação com antimônio e seus compostos são provenientes de sua ingestão, inalação ou absorção pela pele. O sistema respiratório é a mais importante via de contaminação, uma vez que o antimônio é freqüentemente encontrado sob a forma de finas partículas de poeira. A ingestão pode ocorrer através da exposição a poeiras contendo o elemento, ou também através da contaminação de bebidas, alimentos ou cigarros. A absorção pela pele é menos preocupante, uma vez que exige um contato bastante prolongado.

No processo de incineração de resíduos de serviços de saúde contendo antimônio, este elemento será liberado sob a forma de poeira podendo afetar os trabalhadores produzindo irritações no trato respiratório, tais como inflamações por todo o sistema, provocando pneumonia, rinite e perfuração do septo nasal. Estudos revelaram que trabalhadores expostos a este elemento apresentaram também alta incidência de gastrite, dermatite e conjuntivite.^{2,39}

Arsênio

O arsênio ocorre no meio ambiente, na forma inorgânica e orgânica, nos estados tri e pentavalente. O arsênio é largamente encontrado na natureza em minérios contendo sulfetos, sendo a arsenopirita (FeAsS) o minério mais comum. O trióxido de arsênio é obtido principalmente como um subproduto da fundição de minérios de cobre, chumbo e ouro.

De modo geral, há três grupos de compostos de arsênio: compostos inorgânicos, orgânicos e gás arsina.

O arsênio elementar é utilizado em ligas para aumentar sua resistência mecânica e térmica. É também utilizado na fabricação de certos tipos de vidro, e como componente de dispositivos elétricos.

Dentre os compostos inorgânicos, o tricloreto de arsênio é usado na indústria de cerâmica e na fabricação de cloretos deste elemento. O trióxido de arsênio, ou arsênio branco,

é bastante usado na purificação de gases e como matéria prima para fabricação de produtos químicos contendo este elemento. É também utilizado como conservante de peles, tecidos e madeira. O arsenato de cálcio e o acetoarsenato cúprico são inseticidas, sendo que este último também é utilizado em tintas para navios e submarinos. O arsenito de sódio é empregado como herbicida, inibidor de corrosão e como agente secante na indústria têxtil. O trissulfeto de arsênio (III) é um componente de vidro transmissor de raios infra-vermelho, sendo também utilizado em curtumes.

Dentre os compostos orgânicos, o ácido cacodílico $[(CH_3)_2AsOOH]$ é usado como herbicida. O ácido arsenílico $(NH_2C_6H_4AsO(OH)_2)$ é usado como isca de gafanhoto e como aditivo em ração animal. Em organismos marinhos como camarão e peixe, o arsênio ocorre em concentrações de 1 a 100 mg kg⁻¹. Estes compostos, tais como arsenobetaina e arsenocolina, apresentam baixa toxicidade.

O gás arsina é utilizado em sínteses orgânicas e no processamento de componentes eletrônicos. Este gás pode ser gerado inadvertidamente em um processo industrial, quando há a presença de hidrogênio nascente e arsênio. As arsinas substituídas são compostos orgânicos trivalentes que, dependendo do número de alquilas ou fenilas ligadas ao arsênio, são conhecidas mono-, di-, ou tri-substituídas. Por exemplo, dicloroetilarsina e clorovinildicloroarsina são utilizadas como arma química por apresentar odor irritante, já a dimetilarsina pode ser produzida após a transformação metabólica de compostos contendo arsênio em bactérias e fungos.²

No processo de incineração de resíduos de serviços de saúde, o arsênio está inserido no material particulado gerado pelo processo de oxidação térmica, sob a forma de trióxido de arsênio (III) pouco solúvel. A exposição ocupacional a este composto, através da inalação, ingestão e absorção pela pele, provoca irritação no trato respiratório através da deposição das partículas que, lentamente, são transferidas para o trato gastrointestinal provocando gastrite e

úlceras. Dermatites, conjuntivites, bronquites e perfuração nasal ocorrem, mais frequentemente, em casos de exposição a altas concentrações de arsênio e dependerá da solubilização das partículas.

A exposição crônica a este elemento pode resultar em câncer no trato respiratório, além de distúrbios no sistema nervoso e circulatório.^{21,40}

Bário

O bário é abundante na natureza e representa aproximadamente 0,04% da crosta terrestre. As principais fontes deste elemento são os minerais barita (BaSO_4) e *whiterite* (BaCO_3). O bário metálico é produzido em quantidades limitadas pela redução do alumínio presente no óxido de bário.

Este elemento é largamente utilizado na produção de ligas de níquel e bário utilizadas em equipamentos de ignição para automóveis. É também utilizado na produção de vidros, cerâmicas e tubos para televisão.

A barita é utilizada na produção de pigmento branco presente em tintas brancas, nos equipamentos de raios-X e nas indústrias de papel e de vidro. O hidróxido de bário é encontrado em lubrificantes, pesticidas, indústrias de açúcar e inibidores de corrosão dentre outros. O carbonato de bário é encontrado em tijolos, cerâmicas, tintas, borracha, papel dentre outros. O óxido de bário é utilizado com agente secantes de gases e solventes. O cloreto de bário é utilizado na indústrias de pigmentos, indústrias têxteis, curtumes e na refinação do alumínio. Este composto também é utilizado como pesticida. O nitrato de bário é utilizado em indústrias eletrônicas e pirotécnicas.

Os compostos solúveis de bário solúveis são altamente tóxicos, a inalação de compostos insolúveis pode provocar pneumocose. Muitos dos compostos, incluindo sulfeto, óxido e carbonato, podem causar irritação nos olhos, no nariz, na garganta e na pele.

Outros efeitos decorrentes da exposição a este elemento são ação estimulante forte e prolongada sobre toda a musculatura do corpo, aumentando sua contração, comprometendo também o batimento cardíaco. Outros efeitos incluem desconforto intestinal, constrição vascular e contração da bexiga.^{2,39}

Berílio

O berílio é encontrado principalmente sob a forma de um mineral chamado berilo - $\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{Si}_6\text{O}_{18})$. O tipo mais comum de berilo - a água marinha - é encontrada principalmente no Brasil.

O berílio é um metal tão duro que corta o vidro. É um elemento muito tóxico - o óxido liberado na sua combustão, se respirado, pode produzir, mesmo em quantidades inferiores a um miligrama, um envenenamento mortal - a berilose. Esta não se manifesta imediatamente, podendo mesmo aparecer anos depois.

Em água, os sais de berílio sofrem extensa hidrólise, com a formação de uma série de hidroxocomplexos de estrutura ainda desconhecida. Adicionando uma base a essas soluções, os complexos se rompem e dão origem ao íon berilato - $\text{Be}(\text{OH})_4^{-2}$. Muitos sais de berílio contêm o íon hidratado $\text{Be}(\text{H}_2\text{O})_4^{-2}$ em vez de Be^{+2} , sendo o íon hidratado um complexo tetraédrico. A formação de um complexo hidratado aumenta o tamanho efetivo do berílio, distribuindo assim a carga sobre uma área maior. São conhecidos compostos iônicos estáveis como $\text{Be}(\text{H}_2\text{O})_4\text{SO}_4$, $\text{Be}(\text{H}_2\text{O})_4(\text{NO}_3)_2$ e $\text{Be}(\text{H}_2\text{O})_4\text{C}_{12}$.

Em liga com o cobre, é usado na fabricação de molas de grande resistência, como os geofones para o estudo dos terremotos artificiais. Por ser muito leve, é excelente para a construção de mísseis e outros objetos espaciais. Também é utilizado na fabricação de reatores nucleares pela propriedade que seu núcleo tem de não absorver nêutrons.

A exposição ocupacional a este elemento e seus compostos pode provocar lesões pulmonares, as quais resultam em doenças respiratórias tais como rinite, sinusite, bronquite e fibrose pulmonar, em casos de inalação de vapores e poeiras. O contato com a pele pode raramente provocar dermatite e conjuntivite. Estudos epidemiológicos mostram a incidência de câncer no trato respiratório.^{2,39}

Cádmio

O cádmio apresenta propriedades químicas e físicas semelhantes ao zinco, ocorrendo juntamente com este na natureza. Em minerais e rochas, cádmio e zinco geralmente apresentam uma proporção de 1:100 a 1:1000.

O cádmio é altamente resistente a corrosão, sendo largamente utilizado na indústria automotiva. Dentre as principais aplicações deste elemento e seus compostos estão a eletrodeposição, pigmentação de tintas e plásticos e material catódico para baterias Ni-Cd. O cádmio é um subproduto da extração e fundição de zinco e chumbo, que são fontes poluidoras importantes.

O cádmio é um metal altamente tóxico, sendo que a exposição prolongada a baixos níveis de concentração provoca doenças renais crônicas. Efeitos sobre os sistemas esquelético e cardiovascular também podem ocorrer.⁽³⁾ O cádmio afeta o metabolismo do cálcio, com excreção urinária excessiva deste elemento, resultando em alterações no esqueleto.²

Estudos epidemiológicos indicam a possibilidade deste elemento apresentar propriedades carcinogênicas, fazendo-se necessário um controle maior da emissão deste elemento em processos diversos, incluindo-se a incineração de resíduos de serviços de saúde.^{21,40}

Crômio

O crômio é um metal abundante na natureza, ocorrendo nos estados de oxidação de 2^+ a 6^+ , mas somente as formas tri e hexavalente apresentam significância biológica. As formas do crômio hexavalente são de maior importância industrial. Sua origem no meio ambiente é proveniente da produção de ferrocrômio, refino de minério, processos refratários e químicos, combustão de combustíveis fósseis, e incineração de resíduos contendo este metal. Os despejos de indústrias de cromeação, têxteis e curtumes são fontes deste metal e necessitam de tratamento para sua remoção.

A mobilização de crômio natural é efetiva por processos de intemperismo. As emissões atmosféricas lançam em maior proporção o estado trivalente.²

Em sistemas biológicos, o crômio hexavalente é extremamente móvel, sendo difundido sob a forma aniônica CrO_4^{2-} através de membranas celulares. O crômio trivalente é oxidado e ligado à moléculas biologicamente importantes, com resultados tóxicos. A maior parte do crômio apresenta-se sob a forma de $\text{Cr}(\text{OH})_4^-$, com domínio sob a forma adsorvida. A forma hexavalente, tão logo cruza a membrana celular, é transformada em trivalente. Os efeitos prejudiciais em humanos são atribuídos à forma hexavalente. Tem sido investigado que efeitos biológicos do crômio hexavalente podem estar relacionados à redução para crômio trivalente e à formação de complexos com macromoléculas intracelulares.

Compostos de crômio trivalente são considerados menos tóxicos do que compostos de crômio hexavalente, sendo estes últimos rapidamente absorvidos após sua ingestão ou inalação

podendo causar o comprometimento do trato respiratório através de irritação da mucosa, lesões no septo nasal, asma, e até câncer nos pulmões em casos de longa exposição a este elemento. Problemas renais e dermatites também são muito comuns nestes casos.^{21,39}

Cobre

O cobre é um metal abundante na natureza, maleável e dúctil, conduz calor e eletricidade além de ser mais resistente a corrosão, quando comparado ao ferro. Ocorre em minerais e na maior parte dos organismos vivos. Devido a suas propriedades, é largamente utilizado nas indústrias elétricas, seus compostos são utilizados como pigmentos, algicidas, fungicidas, inseticidas, conservantes dentre outros.

Sendo um elemento essencial para o organismo, tem seus níveis de concentração em tecidos influenciados pela presença de molibdênio, demonstrando interações entre os elementos de baixas concentrações.²

A toxicidade ou a deficiência de cobre nos organismos depende não somente de sua ingestão, mas também de níveis introduzidos de Zn, Fe, Ca e Mo. A ingestão de quantidades excessivas de cobre resulta em seu acúmulo no fígado e ocorrência de anemia hemolítica. Geralmente, a toxicidade do cobre é acentuada quando existem baixas concentrações de molibdênio, zinco e sulfato.

A inalação de poeiras e fumos contendo este elemento pode causar congestão nasal, irritação, ulceração e até perfuração do septo nasal. A exposição prolongada causa dores abdominais, e problemas renais.^{21,40}

Chumbo

O chumbo está presente em todas as partes do meio ambiente, a principal fonte deste elemento é a galena (PbS), porém existem outros minerais dos quais extraem-se o chumbo que, muitas vezes, está associado a outros metais tóxicos, tais como cobre, estanho, antimônio, zinco e bismuto.

O chumbo metálico é utilizado sob forma de chapas e tubos que necessitem de flexibilidade e resistência a corrosão, os quais são largamente utilizados por indústrias químicas e de materiais de construção. Este metal também é utilizado como fonte de radiação ionizante. Outra aplicação é a produção de baterias e ligas. Seus compostos são utilizados em indústrias de borracha, de tintas, de vernizes, de esmaltes, de vidro, de inseticida, de combustível e de produtos químicos em geral.²

O maior risco de sua toxicidade é sobre o sistema nervoso. A principal rota de exposição é a alimentação, seguida de fontes industriais tal como a produção de tintas a base de chumbo.

Os efeitos tóxicos de chumbo envolvem vários sistemas orgânicos e atividades bioquímicas. Adultos com exposição ocupacional excessiva, ou mesmo acidental, apresentam: neuropatia, cujos sintomas podem começar com letargia, vômito, irritabilidade, perda de apetite, reduzindo o nível de consciência até a morte; hipertensão e os sistemas reprodutivo e gastrointestinal afetados, além de anemia acompanhada de outros fatores cinérgicos. O chumbo produz alterações nos cromossomos e liga-se fortemente à membrana da mitocôndria. Ele diminui a atividade da ferroquelatase, que catalisa a incorporação do íon ferroso na estrutura do anel porfirínico. As mudanças nas velocidades das atividades enzimáticas oferecem subsídios sobre os níveis sanguíneos e servem como resposta rápida sobre os índices bioquímicos relacionados à exposição ao chumbo.^{21,40}

Merúrio

O merúrio elementar reage facilmente com enxofre e halogênios a temperatura ambiente, e forma amálgamas com vários metais, exceto ferro, níquel, paládio, alumínio, cobalto e platina. Reage exotermicamente com metais alcalinos, é oxidado por ácido nítrico, não reage com ácido clorídrico, e com ácido sulfúrico reage somente a quente.

O merúrio é encontrado na natureza sob forma de sulfeto como minério de cinabre, o qual contém de 0,1 a 4,0% deste elemento. É também encontrado na crosta terrestre sob forma de geodos de merúrio líquido e impregnado em pedras como a ardósia.

Os principais usos deste metal e seus compostos incluem a mineração de ouro e prata; a produção de amálgamas; a produção de lâmpadas incandescentes e de vapor frio de merúrio; produção de válvulas de rádio, tubos de raios-X, baterias e outros; é utilizado como catalisador na produção de cloretos e álcalis dentre outros produtos químicos. Compostos orgânicos contendo merúrio são utilizados como antisépticos, germicidas, diuréticos e contraceptivos. No campo de pesticidas, agem como algicidas, fungicidas e herbicidas. Em tintas, borrachas, látex e papéis são utilizados para combater a proliferação de fungos provenientes da umidade, como o mofo.²

Em casos de exposição a vapores ou poeiras contendo merúrio, a principal forma de contaminação é a inalação, pois 80% do merúrio inalado é absorvido pelos pulmões, o elemento passa ao trato gastrintestinal, uma vez que o material particulado presente nas vias aéreas é dissolvido, concentrando-se principalmente nos rins e no cérebro, provocando distúrbios neuro-musculares e renais.

A contaminação do organismo em casos de exposição crônica ao merúrio e seus compostos começa lentamente, o que inviabiliza o afastamento do indivíduo do ambiente de trabalho. As alterações no sistema nervoso provocam leve tremor muscular e distúrbios

psicomotores, o comprometimento renal pode ser detectado mais rápido em relação ao neurológico. Estomatites, diarreia, anorexia e perda de peso são outras manifestações que podem ocorrer juntamente com as citadas anteriormente.^{21,39}

Níquel

O níquel compreende 5 a 50% do peso de meteoritos e é encontrado na natureza em minérios combinado com enxofre, oxigênio, antimônio, arsênio e/ou sílica. Os óxidos e os sulfetos são de grande importância comercial.

O níquel é largamente utilizado na produção de ligas, dentre estas o aço inoxidável (Ni-Fe-Cr) empregado em utensílios de cozinha por ser bastante resistente a corrosão; ligas de Ni-Cu são utilizadas na fabricação de moedas e no maquinário de indústrias e estabelecimentos alimentícios.

Este elemento têm aplicações diversas incluindo a eletrodeposição, fitas magnéticas e componentes eletrônicos, próteses cirúrgicas e dentárias, baterias, pigmentos, moldes para vidro e cerâmica, dentre outros.²

A exposição ocupacional a este elemento e seus compostos pode provocar dermatite e conjuntivite em casos de absorção pela pele; rinite, sinusite e doenças respiratórias, como bronquite e fibrose pulmonar, em casos de inalação de vapores e poeiras, podendo ocorrer a perfuração do septo nasal de acordo com o nível de concentração do elemento. Estudos epidemiológicos mostram a incidência de câncer no trato respiratório, e em órgão como os rins, o estômago, a laringe e a próstata.^{21,40}

Prata

A prata é encontrada na natureza em minérios juntamente com chumbo, zinco e cobre sob a forma de sulfeto de prata. É utilizada na produção de moedas e ornamentos, em joalherias e cutelarias, e na produção de ligas para aplicações diversas. Outras aplicações deste elemento e seus compostos incluem fabricação de baterias, amálgamas dentários, tintas para cerâmica, indústria de fotografias, eletrodeposição, produção de produtos químicos dentre outras.²

O nitrato de prata é utilizado como inibidor estático, para carpetes e materiais de tecido, como agente antiséptico e adstringente, podendo ser utilizado também em profilaxia oftalmológica. O óxido de prata é utilizado na purificação de água potável e coloração de vidro amarelo na indústria de vidro, e como catalisador na fabricação de solventes. O picrato de prata é usado como antimicrobiano vaginal.

A exposição a poeiras e vapores contendo prata e seus compostos pode provocar argíria, conjuntivite e até perda da visão.

No caso de absorção, a prata deposita-se sobre os tecidos não podendo ser eliminada do organismo no estado sólido, logo dissolve-se sobre a mucosa causando irritações que podem provocar a ulceração da pele levando a perfuração do septo nasal, estas manifestações, em casos de exposição a prata, constituem a argíria mencionada anteriormente.⁴⁰

Selênio

O selênio é encontrado em rochas e solos por todo o mundo. Ocorre na natureza juntamente com telúrio em sedimentos e resíduos da refinação de cobre eletrolítico.

O selênio é utilizado na indústria de vidro para descoloração de vidro verde e para produção de vidro na cor rubi; é utilizado como aditivo na borracha natural e sintética, e também como inseticida. Este elemento também forma ligas com aço inoxidável e cobre.

O selênio é também utilizado para *scanning* radioativo dos pâncreas e para xerografia de raios-X.²

O selênio em sua forma elementar é praticamente inofensivo ao ser humano, porém seus compostos devem ser evitados, pois este elemento em sua forma oxidada pode ser absorvido em grandes quantidades pelos pulmões, intestinos e lesões cutâneas. Muitos compostos de selênio causam queimaduras na pele e nas membranas mucosas, em casos de exposição crônica a baixas concentrações pode provocar dermatites e *paranochia*. A súbita inalação de grandes quantidades de selênio pode produzir edema pulmonar devido a irritação dos alvéolos.

O contato com a pele pode apenas sensibilizar o local afetado como também causar queimaduras. A dermatite é causada por exposição crônica ao material particulado contendo selênio sob a forma de óxido atingindo pescoço, face, podendo estender-se aos braços e porções superiores do tronco.^{21,40}

Tálio

O tálio encontra-se largamente distribuído pela crosta terrestre em pequenas concentrações, é também encontrado com outros metais pesados em piritas e no fundo do mar, com manganês.

O tálio é utilizado na fabricação de seus sais, ligas com mercúrio, vidro resistentes ao calor, células fotoelétricas, lâmpadas e eletrônicos. A liga com mercúrio é utilizada em

termômetros e em alguns interruptores. É também utilizado como semicondutor em pesquisa de imagens do miocárdio. O tálio é utilizado como catalisador em sínteses orgânicas.²

Compostos de tálio são utilizados em espectrofotômetros de infra-vermelho, cristais e outros sistemas óticos, e para coloração de vidros. O sulfato de tálio, em particular é utilizado em agentes químicos para controle de roedores.⁴¹

O tálio é um elemento cumulativo no organismo sendo tóxico pela ingestão, inalação ou absorção pela pele. A exposição ocupacional pode provocar *asthenia*, irritabilidade, dores nas pernas e distúrbios no sistema nervoso. Em casos extremos pode ocorrer a polineurite seguida da perda de cabelos. O tálio concentra-se nos rins, no fígado, nos músculos e ossos.⁴⁰

3. Objetivo

A avaliação das concentrações de metais pesados no ambiente de trabalho de incineradores visa atender aos seguintes objetivos:

- conhecer as exposições efetivas dos trabalhadores durante um determinado período de tempo;
- conhecer os níveis de concentração em locais determinados;
- diagnosticar fontes de emissão de metais no ambiente de trabalho;
- avaliar a eficácia das medidas de controle adotadas;
- comparar os resultados com os padrões de exposição estabelecidos;
- estabelecer as alterações necessárias para a adequação do processo a fim de proteger a saúde do trabalhador e evitar danos ao meio ambiente.

4. EXPERIMENTAL

4.1. Termos e definições⁴²

- a) **Amostra de tarefa de maior risco:** Para efeito deste estudo é a coletada durante um período da tarefa realizada pelo trabalhador que foi considerada de maior risco (limpeza do forno ou retirada de escória) que se realizou em até 40 minutos
- b) **Amostragem:** É o processo de seleção de amostras, baseado em estudos e métodos estatísticos convenientes que possam oferecer resultados representativos da exposição ocupacional ou concentração ambiental.
- c) **Amostragem individual ou pessoal:** Utilizada como medida de avaliação do contaminante do ar do ambiente de trabalho, a que pode estar exposto o trabalhador pertencente a um grupo homogêneo de exposição e o dispositivo de amostragem é colocado na lapela do trabalhador, posicionado na zona respiratória (± 30 cm das narinas)
- d) **Amostragem de área, ambiental ou do ar geral (estática):** onde o dispositivo de amostragem é colocado em um local fixo na área de trabalho. Este local deve ser aquele em que o trabalhador permanece durante seu ciclo de trabalho.
- e) **Análise:** Corresponde a todo o procedimento que conduz à qualificação e quantificação da concentração de constituintes de interesse em uma amostra.
- f) **Avaliação:** Caracteriza-se pelo conjunto de ações necessárias para se realizar uma caracterização completa de um determinado ambiente ou da exposição ocupacional de trabalhadores.
- g) **Coleta:** Corresponde ao processo de se obter uma amostra de constituintes de interesse do ar.

- h) **Concentração do contaminante estudado no ar:** Corresponde a quantidade total do contaminante estudado por unidade de volume de ar. É expressa como massa por unidade de volume (m v^{-1}) ou volume por unidade de volume (v v^{-1}).
- i) **Concentração Média Ponderada no Tempo (CMPT):** Corresponde à concentração de contaminante estudado, obtida pela somatória das concentrações ponderadas pelos respectivos tempos de duração das coletas, dividido pelo somatório dos tempos de coleta. Para efeito deste trabalho é a coletada durante um período de aproximadamente seis horas, que pode ser utilizada como estimativa para a jornada de trabalho de oito horas.
- j) **Distribuição log-normal:** significa que a distribuição de variáveis aleatórias tem a propriedade de que os logaritmos dos seus valores são normalmente distribuídos.
- k) **Estratégia de amostragem:** a estratégia de amostragem descreve como os instrumentos de medição devem ser usados para a avaliação da exposição ocupacional (de indivíduos ou grupos de indivíduos), envolvendo considerações de onde amostrar, duração e frequência da coleta, levando em conta a variabilidade no ambiente de trabalho.
- l) **Grupo Homogêneo de Exposição (GHE):** corresponde a um grupo de trabalhadores que experimentam exposição semelhante de forma que, o resultado fornecido pela avaliação da exposição de qualquer trabalhador do grupo seja representativo da exposição do restante dos trabalhadores do mesmo grupo.
- m) **Limite de Concentração (LC)/limite de exposição ocupacional:** para efeito deste trabalho, corresponde a um valor de concentração de contaminante estudado, média ponderada no tempo, estabelecido pelo Ministério do Trabalho para fins de comparações, quando houver, ou será adotado o valor mais rigoroso encontrado na literatura internacional.

- n) **Local de trabalho, ambiente de trabalho ou zona de trabalho:** corresponde a uma zona espacial ou organizacionalmente definida onde o trabalhador desenvolve sua(s) atividade(s). Uma zona de trabalho pode ser formada por um ou mais locais de trabalho.
- o) $\mu\text{g m}^{-3}$: unidade de concentração correspondente a micrograma de constituintes de interesse por metro cúbico de ar.
- p) **Monitoramento:** é o processo periódico e sistemático da avaliação ambiental de constituintes de interesse.
- q) **Turno ou jornada de trabalho:** refere-se ao período de tempo diário no qual o trabalhador exerce a sua atividade remunerada no ambiente de trabalho.
- r) **Zona de respiração:** região hemisférica com um raio de aproximadamente 30 cm das narinas.

4.2. Local/Incinerador amostrado

Para a realização da parte experimental deste estudo, foram amostrados dois incineradores que pertencem a empresas particulares, as quais prestam serviço a prefeitura, incinerando resíduos de serviços de saúde (RSS). Os incineradores serão discriminados como A e B.

O incinerador A é um forno de leito fixo, constituído de uma câmara de combustão, cujo interior é provido de equipamento para insuflação de ar destinado à combustão e ao turbilhonamento. Queima aproximadamente 10 toneladas de RSS por dia, gerando aproximadamente 0,5 tonelada de escória. Neste sistema é necessário o uso de combustível auxiliar para o início e manutenção da queima. A alimentação e a retirada de escória são totalmente manuais.

Como equipamento de controle da poluição do ar, esta usina apresenta um ciclone, para captação de material particulado, e quatro lavadores de gás Venturi (dois ácidos e dois alcalinos) para a lavagem dos gases provenientes do processo, além de um leito de carvão. Em decorrência deste sistema, há uma estação de tratamento dos efluentes líquidos gerados.

O incinerador B é um forno de leito fixo com sistema de pistão, é constituído de uma câmara de combustão, cujo interior é provido de pequenos orifícios na parte inferior para insuflação de ar destinado à combustão e ao turbilhonamento. Este forno é provido de uma câmara de pós-combustão para oxidar os hidrocarbonetos gasosos não destruídos durante a queima. Queima aproximadamente 5 toneladas de RSS por dia, gerando aproximadamente 0,2 tonelada de escória. Neste sistema é necessário o uso de combustível auxiliar para o início e manutenção da queima. A alimentação e a retirada de escória são realizadas com o auxílio de dois pistões, apresentando um sistema semi-manual.

Como equipamento de controle da poluição do ar, esta usina apresenta um ciclone, para captação de material particulado, e quatro lavadores de gás Venturi, dois ácidos e dois alcalinos, para a lavagem dos gases provenientes do ciclone. Em decorrência deste processo, há uma estação de tratamento de efluentes líquidos gerados.

Estes incineradores apresentam vantagens tais como: baixo custo de instalação, e viabilização da redução de volume de resíduos volumosos sem o uso de grandes quantidades de combustível auxiliar. Em contrapartida, constitui-se em uma fonte de emissão de compostos carcinogênicos, não é recomendado para queima de resíduos com nitrogênio, enxofre, metais, sódio, silício, fósforo, flúor, bromo, cloro ou iodo; não é adequado para a incineração de lodos sem estar internamente equipado para a remoção de crostas; normalmente a remoção de cinzas e escória requer a parada do incinerador. Além disso, há a desvantagem do processo de alimentação e retirada de escória manual ou semi-manual, o que favorece o risco ocupacional.¹⁶

4.3. Estratégia de amostragem

O incinerador A localiza-se na parte interna de um salão de alvenaria, juntamente com a área de armazenamento dos RSS, funcionando em três turnos cobrindo 24 horas. Por turno, há dois trabalhadores que realizam a alimentação do forno, sendo que os horários não são os mesmos para todos os trabalhadores, por exemplo, o trabalhador Tr. 1 entra às 7:00 horas e sai às 17:00h, já o trabalhador Tr. 2 entra às 9:00h e sai às 19:00h. O trabalhador Tr. 2 não participa da operação de limpeza do forno.

Para avaliação da exposição dos trabalhadores aos metais estudados durante a jornada de trabalho no incinerador A foram realizadas amostras individuais, amostrando os dois trabalhadores, Tr. 1 e Tr 2, do turno diurno cada um como um grupo homogêneo de exposição, GHE 1 e GHE2, respectivamente. Portanto, a amostragem será feita através de amostras únicas em período completo (cerca de 6 horas); acompanhada de amostra de maior risco (atividade de limpeza do forno ou retirada de escória). Esta atividade tem duração de cerca de 40 minutos, dependendo da quantidade de escória a ser retirada. Esta atividade é realizada por dois trabalhadores e cada trabalhador será considerado um grupo homogêneo de risco (GHE).

Também foram realizadas quatro amostras de ponto fixo para auxiliar na avaliação da exposição do trabalhador durante a jornada de trabalho, assim como também na atividade da retirada de escória. Na Figura 5, são apresentadas as posições dos amostradores para amostras de ponto fixo. Para escolha dos pontos de coletas foi considerado o lugar em que os trabalhadores mais circulam durante sua jornada de trabalho.

Figura 5: Representação do incinerador na parte interna do galpão e distribuição dos pontos fixos de amostragem no incinerador

Em resumo, para um dia de amostragem foram coletadas em média 20 amostras: quatro amostras individuais, sendo uma para cada trabalhador durante a jornada de trabalho e para atividade de limpeza do forno, e seis amostras de ponto fixo, quatro para jornada parcial de trabalho e duas de tarefa de maior risco. Como para mercúrio foi usado hopcalite e para os demais metais foi usado filtro éster celulose como coletor, foram coletadas amostras paralelas para o mercúrio e demais metais, totalizando assim 20 amostras por dia de amostragem como ilustra a Tabela 6.

Tabela 6: Número de amostras coletadas por dia de amostragem no incinerador A

	Número de amostras para análise de As, Ba, Be, Cr, Ni, Cu, Cd, Pb, Ag, Se, Sb, Tl	Número de amostras para Hg	Total
Jornada parcial de trabalho:			
Amostras individuais	2	2	4
Amostras de ponto fixo	4	4	8
Amostra de tarefa de maior risco (limpeza do forno):			
Amostras individuais	2	2	4
Amostras de ponto fixo	2	2	4
Total	10	10	20

O incinerador B localiza-se na parte interna de um salão de alvenaria, sendo que a área de armazenamento dos RSS situa-se em um galpão separado, funcionando em um único turno das 8:00h às 17:00h. Há dois trabalhadores que realizam tanto a operação de limpeza do forno como a alimentação do forno.

Para avaliação da exposição dos trabalhadores aos metais estudados durante a jornada de trabalho no incinerador B foram realizadas amostras individuais, amostrando cada trabalhador, Tr. 1 e Tr 2, do turno como grupos homogêneos de exposição, GHE 1 e GHE2, respectivamente. Portanto, a amostragem foi realizada através de amostras únicas em período completo (cerca de 6 horas); acompanhada de amostra de maior risco (atividade de limpeza do forno ou retirada de escória). Neste incinerador esta atividade também tem duração de cerca de 40 minutos, dependendo da quantidade de escória a ser retirada. Esta atividade é

realizada por dois trabalhadores e cada trabalhador será considerado um grupo homogêneo de risco (GHE).

Foram realizadas seis amostras de ponto fixo para auxiliar na avaliação da exposição do trabalhador durante a jornada de trabalho, assim como também na atividade da retirada de escória. Na figura 7, são apresentadas as posições dos amostradores para amostras de ponto fixo. Para escolha dos pontos de coletas foi considerado o lugar em que os trabalhadores mais circulam durante sua jornada de trabalho.

Figura 6: Representação do incinerador na parte interna do galpão e distribuição dos pontos fixos de amostragem no incinerador

Em resumo, para um dia de amostragem foram coletadas em média 24 amostras: quatro amostras individuais, sendo uma para cada trabalhador durante a jornada de trabalho e para atividade de limpeza do forno, e oito amostras de ponto fixo, seis para jornada parcial de trabalho e duas de tarefa de maior risco. Como para mercúrio foi usado hopcalite e para os demais metais foi usado filtro éster celulose como coletor, foram coletadas amostras paralelas

para o mercúrio e demais metais, totalizando assim 24 amostras por dia de amostragem como ilustra a Tabela 7.

Tabela 7: Número de amostras coletadas por dia de amostragem no incinerador B

	Número de amostras para análise de As, Ba, Be, Cr, Ni, Cu, Cd, Pb, Ag, Se, Sb, Tl	Número de amostras para Hg	Total
Jornada parcial de trabalho:			
Amostras individuais	2	2	4
Amostras de ponto fixo	6	6	12
Amostra de tarefa de maior risco (limpeza do forno):			
Amostras individuais	2	2	4
Amostras de ponto fixo	2	2	4
Total	12	12	24

4.4. Coleta de amostra

Para os metais As, Ba, Be, Cr, Ni, Cu, Cd, Pb, Ag, Se, Sb, Tl foram utilizados filtros de membrana de éster celulose com porosidade igual a 0,8 μm , diâmetro de 37mm (Millipore AAWP03700) e para o mercúrio tubos de hopcalite (Anasorb C300; SKC, 226-17-1A) como recomendado pelo NIOSH (1994).²⁷

Realizou-se a amostragem do ar com o auxílio de bombas portáteis de baixa vazão devidamente calibradas, com vazão ajustada em $2,0 \text{ L min}^{-1}$, em filtros de membrana de éster de celulose. Para os tubos de hopcalite, a vazão ajustada foi $0,2 \text{ L min}^{-1}$, com o auxílio de um redutor de vazão. Os filtros de membrana são montados em porta-filtros de poliestireno de três corpos que será descrito no item a seguir.

Para amostragem individual, o ar é tomado próximo a zona respiratória do trabalhador, afixando os dispositivos de amostragem no uniforme do trabalhador, e as bombas afixadas em um cinto na altura da cintura do mesmo (Foto 1).

Para amostragem de ponto fixo, os porta-filtros e os tubos bem como as bombas foram montados sobre um tripé, a aproximadamente 1,6m de altura, próximo ao equivalente à zona respiratória do trabalhador (Foto 2).

Foto 1: Posicionamento de cassete e tubo de “hopcalite” (Hg) durante amostragem individual

Foto 2: Tripé com sistema de amostragem de ponto fixo

Ao término de cada coleta, os cassetes e os tubos de hopcalite foram devidamente fechados, seguindo para análise em uma caixa metálica com interior forrado com espuma, para manter a integridade da amostras.

4.5. Montagem dos porta-filtros

Os porta-filtros devem ser desmontados em três corpos, separando suas três partes (tampa, anel central e fundo).

Utilizando-se de uma pinça, coloca-se o suporte do filtro na parte inferior (fundo) da unidade e sobre ele coloca-se cuidadosamente o filtro, evitando danificá-lo.

Conecta-se as outras duas partes da unidade (anel e tampa) à parte inferior (fundo), pressionando-as firmemente, a fim de evitar vazamentos. O fechamento também pode ser feito como auxílio de uma prensa manual.

Circunda-se as juntas da unidade de filtração com fita de Teflon, para garantir a vedação perfeita.

Fecham-se e identificam-se as extremidades, da entrada e saída de ar, conforme convenção a fim de reconhecer facilmente se a unidade já foi utilizada ou não. O desenho na Figura 7 ilustra a montagem dos porta-filtros.

Figura 7: Esquema da montagem dos cassetes

4.6. Instrumentação

Para a amostragem do mercúrio e do material particulado presente no ar do ambiente ocupacional, foram utilizadas bombas de sucção modelo VSS-5 da BUCK-GENIE, munidas de um sistema de compensação de temperatura e pressão, quantificando o ar amostrado em volume real coletado durante a amostragem, como mostra o exemplo de relatório inserido no

Anexo A.⁴³ Os dispositivos foram conectados a bomba por meio de mangueira de silicone com diâmetro interno de 0,7 cm. Estas bombas foram calibradas antes do uso com o auxílio de um calibrador automático modelo Gilibrator-2 / Primary Flow Calibrator da Gilian.

Para o tratamento das amostras de material particulado foi utilizado um forno de microondas convencional modelo MDS-2000-2 da CEM, sistema fechado, composto por um magnetrom com potência nominal de 1500W e uma bandeja giratória para 12 frascos de digestão de Teflon.⁴⁴ Os frascos de digestão têm volume de 120mL e possuem membrana de ruptura, sendo um dos frascos equipado com sensores de pressão e temperatura. O forno tem como parâmetros de controle a potência a ser incidida, o tempo de incidência, a temperatura e a pressão, sendo os dois últimos apenas no frasco sensor.

Para a análise dos metais (As, Ba, Be, Cr, Ni, Cu, Cd, Pb, Ag, Se, Sb e Tl) foi utilizado um espectrômetro de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) modelo Spectroflame Módulo da Spectro Co. O equipamento seqüencial é composto por dois sistemas óticos com grade de difração holográfica de 2400 linhas por milímetro, uma faixa de trabalho de 165 a 230 nm em atmosfera de argônio e uma faixa ótica de trabalho de 230 a 800nm ao ar, sete detectores fotomultiplicadora montados no ciclo de Howland, um gerador de radio frequência de 27,12 MHz permitindo um ajuste de potência entre 750 e 2500W e uma tocha de quartzo concêntrica fixa. O sistema de injeção da amostra é equipado com uma bomba peristáltica, nebulizador pneumático concêntrico (Meinhard) do tipo C (vazão de até 3 litros por minuto e até 1% de sólido dissolvido) e uma câmara de nebulização de duplo passo. O gás utilizado foi Argônio (99,9% v/v Air Liquide). Os parâmetros instrumentais utilizados estão descritos na tabela 8, os comprimentos de onda mencionados apresentaram-se livres de interferência espectral e de matriz.

Tabela 8: Parâmetros instrumentais utilizados no ICP-OES

Introdução de amostra		
Pré-fluxo de introdução	10 s (vazão de 4 mL min ⁻¹)	
Fluxo para a Leitura	20 s (vazão de 2 mL min ⁻¹)	
Instrumental		
Potência aplicada ao plasma	1200 W	
Fluxo do nebulizador	1,0 mL min ⁻¹	
Gás de refrigeração	12,0 L min ⁻¹	
Gás auxiliar	1,2 L min ⁻¹	
Tempo de integração	3 s	
Comprimento de onda utilizado	As = 188,979 nm	Ag = 338,289 nm
	Be = 313,107 nm	Se = 196,020 nm
	Cr = 284,325 nm	Sb = 231,147 nm
	Ni = 231,604 nm	Tl = 351,924 nm
	Cu = 324,754 nm	Ba = 233,527 nm
	Cd = 226,502 nm	Pb = 168,220 nm

Para a determinação de mercúrio foi utilizado um espectrômetro de absorção atômica com sistema de vaporização a frio (Varian AA 1275). O equipamento possui uma célula de quartzo de 14 cm de comprimento acoplada ao sistema de vaporização, o qual utiliza como gás carreador o nitrogênio (FID 4.5 - White Martins), um monocromador com espelhos óticos de quartzo, uma fotomultiplicadora de 9 estágios SEV (EHT) R928, corretor de radiação de fundo com lâmpada de deutério. Como fonte de radiação foi utilizada uma lâmpada de catodo oco de mercúrio (Cathodeon - 3QNY/Hg). Os parâmetros instrumentais utilizados estão na tabela 9:

Tabela 9: Parâmetros instrumentais utilizados no EAA

<i>Introdução de amostra</i>	
Fluxo para a Leitura	3 mL min ⁻¹
Instrumental	
Comprimento de onda	253,7 nm
Fenda	0,2 nm
Corrente da lâmpada	3mA
Tempo de integração	30s

4.7 Reagentes e soluções

A água para o preparo das soluções analíticas de referência e diluição das amostras foi destilada e deionizada, através de colunas de troca iônica e de um sistema de ultrapurificação Milli Q (Millipore, Bedford, MA, USA). Ácido nítrico e ácido clorídrico têm procedência MERCK (Darmstadt, Alemanha) grau p.a.

Toda a vidraria e frascos de polietileno para a armazenagem de soluções foram lavados com detergente neutro, preenchidos com solução de ácido nítrico 10% v v⁻¹ e, somente antes da utilização, estes materiais foram enxaguados com água deionizada.

Para a calibração do espectrômetro de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado, foram preparadas soluções analíticas de referência de 0,01 mg L⁻¹, 0,1 mg L⁻¹, 1 mg L⁻¹, 10 mg L⁻¹ e 100 mg L⁻¹, a partir de solução estoque de cada metal, ou seja, 1000 mg L⁻¹ (MERCK, Darmstadt, Alemanha) de As, Ba, Be, Cr, Ni, Cu, Cd, Pb, Ag, Se, Sb e Tl.

Para a calibração do espectrômetro de absorção atômica com geração de vapor frio de mercúrio, foram preparadas soluções analíticas de referência de 0,01 mg L⁻¹, 0,02 mg L⁻¹, 0,04 mg L⁻¹, 0,06 mg L⁻¹ e 0,08 mg L⁻¹, a partir de solução estoque de mercúrio, ou seja, 1000 mg L⁻¹ (MERCK, Darmstadt, Alemanha).

No sistema de vaporização de mercúrio a frio, utilizou-se água deionizada como solução carreadora. O agente redutor utilizado foi cloreto estanoso 25% (m v^{-1}) em meio de ácido clorídrico 20% (v v^{-1}).

4.8. Preparação das amostras

De acordo com a metodologia aplicada, o material particulado, coletado sobre o filtro de membrana de éster de celulose, deve ser decomposto em um forno de microondas conforme procedimento descrito a seguir.

Após abertura do compartimento dos filtros, os mesmos foram transferidos integralmente cada amostra para um vaso de digestão de teflon PFA com capacidade para 120 mL, adicionou-se 5,0 mL de ácido nítrico concentrado, após o término da reação violenta, tampou-se o recipiente, colocando-o no forno de microondas por 25 min, a 80 psi de pressão, atingindo 180 °C de temperatura, utilizando-se 90 % da potência do forno.

Após este procedimento, o conteúdo do vaso foi transferido quantitativamente para um balão volumétrico de 25 mL, completando-se o volume deste com água deionizada.

De acordo com a metodologia aplicada, o mercúrio coletado pela resina hopcalite deve ser tratado conforme o procedimento descrito a seguir.

As extremidades do tubo foram abertas e o conteúdo do tubo contendo a resina e os plugs de lã de vidro foram transferidos quantitativamente, com auxílio de uma pinça metálica revestida com Teflon, para um balão volumétrico de 50 mL, completando-se o volume com água deionizada.

Paralelamente, foram preparadas três amostras em branco, tanto do filtro de éster de celulose quanto da resina de hopcalite, para cada série de amostragem.

4.9. Limite de Quantificação

Para o cálculo dos valores de limite de quantificação dos metais estudados nas amostras de jornada parcial e de tarefa de maior risco foi considerado um volume médio de ar amostrado de $0,672 \text{ m}^3$ para as amostras de jornada parcial, que corresponde a 70 % (336 minutos) de uma jornada de 8 horas (480 minutos) para uma vazão média de $2,0 \text{ L min}^{-1}$ da bomba de amostragem. Para o mercúrio cuja vazão da bomba foi de $0,2 \text{ L min}^{-1}$, o volume médio considerado foi de $0,0672 \text{ m}^3$.⁴⁵

Para as amostras de tarefa de maior risco considerou-se a média do tempo necessário para realização da operação que é de 36 minutos o que corresponde a $0,072 \text{ m}^3$ para a vazão de 2 L min^{-1} e $0,0072 \text{ m}^3$ para a vazão de $0,2 \text{ L min}^{-1}$ usado para o mercúrio. A Tabela 10 mostra os valores de limite de quantificação para os metais estudados.⁴⁶

Os valores de quantificação para cada elemento foi calculado como sendo a concentração em $\mu\text{g mL}^{-1}$, correspondente a 10 vezes o valor da estimativa do desvio padrão do branco, com 11 leituras.⁴⁵

Tabela 10: Valores de limite de quantificação para as análises de metais das amostras de jornada parcial e de tarefa de maior risco $\mu\text{g m}^{-3}$

Elemento	Limite de Quantificação ($\mu\text{g m}^{-3}$)	
	Jornada de trabalho Vol. Ar = 0,672 m ³ Temp. amostragem: 336 min Vazão da bomba: 2 L min ⁻¹	Tarefa de maior risco Vol. Ar = 0,072 m ³ Temp. amostragem: 36 min Vazão da bomba: 2 L min ⁻¹
Be	0,33	0,99
Cr	4,8	14
Ni	16	47
Cu	0,56	5,3
As	0,50	4,6
Se	0,23	2,3
Ag	1,2	11
Cd	0,30	2,6
Sb	5,8	54
Ba	0,36	3,3
Tl	4,9	46
Pb	3,6	34
Hg	1,0*	9,6**

*) volume médio de ar amostrado: 0,0672 m³, tempo médio de amostragem: 336 min., vazão média de 0,2 L min⁻¹

**) volume médio de ar amostrado: 0,0072 m³, tempo médio de amostragem: 36 min., vazão média de 0,2 L min⁻¹

De acordo com a tabela acima, constata-se que os valores de limites de quantificação obtidos são inferiores aos limites de concentração adotados para este estudo, sendo adequados para a metodologia analítica utilizada, comprovando-se que os equipamentos apresentam boa sensibilidade para a realização das análises.