

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
METALÚRGICA E DE MINAS**

**TESE DE DOUTORAMENTO**

**“Metodologia para Reciclagem de  
Resíduos Sólidos Industriais”**

**Autora: Dinalva Celeste Fonseca  
Orientador: Antônio Eduardo Clark Peres**

**Março/2000**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas**

**Dinalva Celeste Fonseca**

**METODOLOGIA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS**

Tese de Doutorado apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de Concentração: Tecnologia Mineral

Orientador: Prof. Antônio Eduardo Clark Peres

**Belo Horizonte**

**Escola de Engenharia da UFMG**

**2000**

# METODOLOGIA PARA RECICLAGEM DE RESIDUOS SOLIDOS INDUSTRIAIS

DINALVA CELESTE FONSECA

Tese submetida à Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Minas.

Aprovada em 20 de março de 2000.

Por:



Prof. Antônio Eduardo Clark Peres, Ph.D. (UFMG)  
Orientador



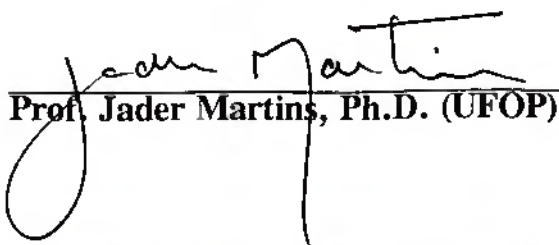
Prof. Dagoberto Brandão Santos, Dr. (UFMG)



Prof. Raul Zanoni Lopes Cançado, Dr. (UFMG)



Maria Lúcia Magalhães de Oliveira, Dr. (CDTN)



Prof. Jader Martins, Ph.D. (UFOP)

Aprovada pelo Colegiado do CPGEM

Versão final aprovada por



Prof. Dagoberto Brandão Santos  
Coordenador do CPGEM/UFMG



Professor/ Orientador

***“À MINHA FAMÍLIA E AOS MEUS AMIGOS.”***

## AGRADECIMENTOS

Aos amigos e principalmente ao Prof. Antônio Eduardo Clark Peres, meu orientador, pelo apoio, paciência e amizade a mim dedicada.

Aos meus pais, irmãos e sobrinhos, aos meus eternos amigos, especialmente Andréa de Magalhães Barbalho, Sérgio Henrique Vianna Machado (*in memoriam*) e Sotírios Theofane Pegos pela atenção, incentivos e apoio nos momentos de felicidade e de dificuldades.

À BRANDT MEIO AMBIENTE, às instituições e empresas pelo apoio de apresentar, transmitir e discutir o assunto de resíduos como um dos fatores primordiais na atualidade.

A todos os que incentivaram, contribuíram nas discussões para a preparação e elaboração dos trabalhos.

**O FUTURO NÃO É EXATAMENTE O QUE COSTUMAVA SER...RECICLE.**

## SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO .....	1
2 - OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS.....	4
3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1 - Conceitos e Sistemas .....	5
3.1.1 - Resíduos sólidos e tipos de resíduos .....	5
3.1.2 - Manuseio de resíduos.....	8
3.2 - Tecnologias de Tratamento de Resíduos Sólidos.....	8
3.2.1 - Processos físico-químicos .....	10
3.2.2 - Tratamentos químicos .....	15
3.2.3 - Processos térmicos.....	19
3.2.4 - Tratamentos biológicos.....	28
3.3 - Resíduos Sólidos Gerados nos Setores Industriais do Estado de Minas Gerais .....	30
3.3.1 - Reciclagem dos resíduos das indústrias metalúrgicas e siderúrgicas.....	33
3.3.1.1 - Escórias de alto-forno .....	35
3.3.1.2 - Finos de carvão e de minério .....	44
3.3.1.3 - Reciclagem de resíduos nas plantas de sinterização.....	47
3.3.1.4 - Reciclagem de resíduos: pós e lamas.....	57
3.3.1.5 - Reciclagem de sucatas metálicas .....	69
3.4 - Reciclagem de Resíduos das Indústrias do Setor mineral.....	70
4 - METODOLOGIA.....	73
4.1 - Estudos Preliminares .....	79
4.2 - Formulação da Hipótese.....	80

4.3 - Estudos Desenvolvidos.....	88
4.3.1 - Caracterização dos resíduos .....	89
4.3.1.1 - Torta da Estação de Tratamento de Efluentes Acidulados-ETEA	89
4.3.1.2 - Carepa de trefilação e decalaminação .....	94
4.3.1.3 - Finos de minério de ferro .....	97
4.3.2 - Equipamentos Utilizados .....	98
4.4 - Desenvolvimento dos Testes de Pelotização.....	99
4.4.1 - Testes realizados.....	99
5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	104
5.1 - Caracterização Química das Pelotas e das Mini-pelotas .....	104
5.2 - Ensaio de Qualidade.....	105
5.3 - Simulações de Utilização das Pelotas e das Mini-pelotas Produzidas.....	107
5.4 - Avaliação Preliminar dos Custos e Benefícios.....	113
6 - CONCLUSÕES .....	121
6.1 - Metodologia Proposta .....	121
6.2 - Avaliação dos Resultados dos Estudos Desenvolvidos.....	122
7 - CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS AO CONHECIMENTO .....	124
8 - RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS.....	125
9 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	127
10 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	128
11 - DADOS BIOGRÁFICOS DO AUTOR.....	135

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Principais fases no tratamento de resíduos: primária, secundária e de polimento .....	11
Figura 3.2 - Principais componentes do sistema de incineração de resíduos..	22
Figura 3.3 - Fluxograma dos experimentos - Aplicação de escória nos canteiros de obra na mistura do concreto .....	40
Figura 3.4 - Comparação entre a mistura para produção de cimentos Portland e cimento de escória.....	42
Figura 3.5 - Fluxograma das principais alternativas de recuperação de resíduos de lama.....	64
Figura 3.6 - Fluxograma para obtenção do produto vítreo-cerâmico.....	68
Figura 4.1 - Fluxograma da metodologia para reciclagem de resíduos sólidos industriais.....	74
Figura 4.2 - Fluxograma da Estação de Tratamento de Efluentes Acidulados.	89
Figura 5.1 - Fluxograma da planta de aglomeração dos subprodutos por pelotização.....	116

## LISTA DE TABELAS

Tabela III.1 - Classificação de resíduos sólidos .....	7
Tabela III.2 - Reações de oxidação-redução usadas no tratamento de resíduos. 17	
Tabela III.3 - Resíduos químicos inorgânicos que podem ser tratados através de hidrólise .....	18
Tabela III.4 - Valores aproximados de PCI de diferentes produtos e resíduos ....	21
Tabela III.5 - Processos alternativos de incineração e suas variações operacionais típicas .....	27
Tabela III.6 - Sugestões para a reciclagem dos resíduos sólidos gerados pelos principais setores industriais do estado de Minas Gerais .....	31
Tabela III.7 - Resíduos sólidos industriais gerados por etapa do processo na CSN .....	35
Tabela III.8 - Composição química típica para as escórias ácidas e básicas de fornos brasileiros e cimento Portland.....	36
Tabela III.9 - Outras aplicações de escória .....	43
Tabela III.10 - Resíduos sólidos recicláveis da CSN - Etapas dos estudos .....	48
Tabela III.11 - Características físico-químicas da mistura de resíduos .....	49
Tabela III.12 - Resultados do monitoramento das emissões atmosféricas .....	50
Tabela III.13 - Resumo dos testes-piloto realizados na CST - Aproveitamento dos resíduos na planta de sinterização.....	51
Tabela III.14 - Composição química da mistura de rejeitos siderúrgicos .....	52
Tabela III.15 - Resultados da caracterização de um resíduo da aciaria elétrica .....	55

Tabela III.16 - Ciclos térmicos empregados nas pelotas produzidas para determinados lotes de amostras.....	55
Tabela III.17 - Geração de resíduos de lamas e pós nos processos de fabricação de aço no Japão (Dados de 1984) .....	58
Tabela III.18 - Características das técnicas do pré-tratamento dos resíduos .....	60
Tabela III.19 - Principais usos da lama vermelha gerada no Processo Bayer .....	66
Tabela III.20 - Composição química apresentada para três lamas vermelhas de diferentes origens .....	67
Tabela IV.1 - Carregamento dos altos-fornos .....	81
Tabela IV.2 - Composição química da carga metálica dos altos-fornos.....	82
Tabela IV.3 - Resultados da caracterização da amostra bruta do resíduo torta da ETEA e da carepa .....	83
Tabela IV.4 - Resultados dos balanços de massa para as proposições 1 e 2 Mistura da Torta da ETEA + carepa + as cargas metálicas dos AF-A, AF-B e AF-D .....	85
Tabela IV.5 - Resultados dos balanços de massa para a proposição 3 Mistura da torta da ETEA e as cargas metálicas dos AF-C e AF-E .	87
Tabela IV.6 - Resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização da torta da ETEA .....	91
Tabela IV.7 - Resultados da caracterização física e química da torta da ETEA....	92
Tabela IV.8 - Resultados da caracterização granulométrica da torta da ETEA.....	93
Tabela IV.9 - Resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização da carepa .....	95

Tabela IV.10 - Resultados da caracterização física e química da carepa .....	96
Tabela IV.11 - Resultados da caracterização granulométrica da carepa .....	96
Tabela IV.12 - Caracterização química dos finos de minério de ferro .....	97
Tabela IV.13 - Resultados da caracterização granulométrica dos finos de minério de ferro.....	98
Tabela IV.14 - Parâmetros operacionais determinados no processo de pelotização.....	101
Tabela V.1 - Resultados da caracterização química das pelotas e mini-pelotas..	104
Tabela V.2 - Utilização e Proporções Simuladas 8:1:1 e 3:1:1 (PFF:torta da ETEA:carepa) .....	108
Tabela V.3 - Proposição 8:1:1 - Carregamento dos altos-fornos A, B e D - Simulação 1 .....	109
Tabela V.4 - Proposição 3:1:1 - Carregamento dos altos-fornos A, B e D - Simulação 2 .....	110
Tabela V.5 - Proposição 8:1:1 - Carregamento no alto-forno E - Simulação 3.....	111
Tabela V.6 - Proposição 3:1:1 - Carregamento no alto-forno E - Simulação 4.....	112
Tabela V.7- Proposição 8:1:1 - Carregamento na planta de sinterização - Simulação 5 .....	114
Tabela V.8 - Proposição 3:1:1 - Carregamento na planta de sinterização - Simulação 6 .....	115
Tabela VII.1 - Estimativas dos investimento da planta de pelotização dos subprodutos.....	118
Tabela VII.2 - Custos de operação da planta de pelotização.....	119

## LISTA DE NOTAÇÕES

<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>ISO</b>	<i>International Standard Organization</i>
<b>VOC's</b>	Compostos Orgânicos Voláteis
<b>SVOC's</b>	Compostos Orgânicos Semi-voláteis
<b>IPT</b>	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
<b>CSN</b>	Companhia Siderúrgica Nacional
<b>CST</b>	Companhia Siderúrgica Tubarão
<b>ETEA</b>	Estação de Tratamento de Efluentes Acidulados
<b>AF</b>	Alto-forno
<b>NPO</b>	<i>Natural Pellet Ore</i>

## RESUMO

Este documento apresenta a tese de doutoramento - Metodologia para Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais - assunto de suma importância nos dias atuais. Realizou-se a revisão bibliográfica referente às definições e aos conceitos relacionados com resíduos sólidos, ao sistema de reciclagem de resíduos sólidos gerados pelos principais setores industriais do Estado de Minas Gerais (metalurgia/siderurgia e mineração). O objetivo da pesquisa consistiu em elaborar uma metodologia para Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais e aplicá-la no desenvolvimento dos trabalhos em escala laboratorial para os resíduos Torta da Estação de Tratamento de Efluentes Acidulados e Carepa, aqui denominados de subprodutos. A relevância da pesquisa contempla os ganhos sob os aspectos ambientais, sociais e econômicos quando a destinação final dos resíduos passa pelo sistema de reciclagem. Entende-se aqui, que o termo reciclagem consiste em todas as operações com os resíduos sólidos, desde a minimização na sua geração, o manuseio, a segregação, a destinação final através do tratamento visando o seu reaproveitamento ou reutilização.

## ABSTRACT

This document presents the doctoral thesis - Methodology for Industrial Solid Wastes Recycling - a highly relevant subject at present. A literature review was performed concerning the definitions and concepts related to solid wastes and to recycling systems of solid wastes generated by the major industrial segments of the state of Minas Gerais (metallurgy/iron and steel making and mining). The objective of the investigation was establishing a methodology for Industrial Solid Wastes Recycling and then applying it, at laboratory scale, to the processing of the residues Cake from the Acidulated Effluents Treatment Station and Scale, here denominated byproducts. The relevance of the investigation contemplates gains on environmental, social and economical aspects regarding the final destination of the wastes submitted to the recycling system. It is understood that recycling means all operations performed on solid wastes, from minimizing the generation, including handling, segregation and the final destination after the treatment aiming at the reutilization.

## 1 - INTRODUÇÃO

Cresce no Brasil o interesse pelas questões ambientais, fato exemplificado pelo crescente número de ONG's, cursos de pós-graduação em meio ambiente e pela importância dada pelos setores empresariais às normas que estão sendo desenvolvidas pela ISO - *International Standard Organization*, relativas à questão ambiental, mais comumente conhecidas como série ISO - 14000. Outro fato relevante é a introdução de leis cada vez mais rigorosas e restritivas, resultantes da afirmação, cobrança e vitórias ambientalistas que a sociedade civil vem conseguindo desde a década de 80 até os dias atuais.

Além desses novos fatos, os problemas de degradação ambiental, observados há muito tempo nos países desenvolvidos, começam a despertar a consciência de que o homem depende do seu ecossistema para viver<sup>(1)</sup>.

Os conceitos modernos do desenvolvimento sustentável envolvem, sem dúvida, a reciclagem de resíduos industriais. Os resíduos industriais, sejam eles gerados no ambiente urbano (maioria) ou rural, representam na verdade ineficiências operacionais das indústrias ou impossibilidades tecnológicas atuais de aproveitamento total<sup>(2)</sup>.

Sabe-se que em toda a história, o homem gera e deposita seus resíduos de duas maneiras, diretamente no solo e/ou através da queima. Estes métodos foram completamente aceitáveis pelas sociedades existentes. Hoje, esta prática permanece na grande maioria dos casos devido à sua praticidade, porém a sociedade moderna, os órgãos ambientais e as organizações vêm criticando e exigindo novas formas de controle.

Dentro deste contexto, a nova consciência ambiental vem gerando um nível crescente de exigências nos municípios, setores metalúrgico/siderúrgico, mineral e demais indústrias, sob os aspectos de programas de gestão das emissões atmosféricas, efluentes líquidos e resíduos sólidos. Em se tratando da gestão de

resíduos sólidos, a resposta a essas exigências leva, sem dúvida, à necessidade de formas de minimização e reciclagem dos resíduos<sup>(2)</sup>.

No que se refere especificamente aos meios econômicos, os sistemas de gestão de resíduos são objetos prioritários em fomentar sua incorporação em todas as fases do ciclo produtivo. Essa incorporação se dá através de critérios e tecnologias que permitem o máximo de eficiência energética, tanto na fabricação, quanto no desempenho dos bens produzidos, eliminando desperdício, minimizando a geração e a reutilização dos bens materiais (sempre que possível), diminuindo a poluição, incorporando mecanismos de controle nos próprios processos produtivos e priorizando medidas preventivas mais que as corretivas.

Este fato vem ocorrendo desde 1990, com o conceito de "prevenção de poluição" tendo como foco - "Descarga Zero", minimização de resíduos ou redução na emissão. Contudo, para o atendimento da emissão zero são necessários desenvolvimentos de tecnologias com viabilidade econômica<sup>(3)</sup>.

As regulamentações sobre resíduos sólidos iniciaram-se em 1976 com a passagem da *Resource Conservation and Recovery Act* (RCRA), continuando em 1980 com a *Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act* (CERCLA) e a *Hazardous and Solid Waste Amendments* em 1984 e culminando em 1986 com a *Superfund Amendments and Reauthorization Act* (SARA). Estas regulamentações não somente limitaram os tipos e as quantidades dos resíduos que podem ser depositados no solo, mas também prescrevem tecnologias para tratamento de resíduos, seja através de processos térmicos, físico/químicos ou biológicos<sup>(4)</sup>.

Dentro deste contexto, este documento apresenta a revisão bibliográfica sobre os conceitos e os sistemas de reciclagem de resíduos sólidos. O objetivo desta pesquisa consiste na apresentação de uma metodologia para reciclagem de resíduos, buscando a semelhança da atividade de reciclagem de resíduos e a de prospecção exploração geológica, pois os resíduos industriais podem, sem dúvida, ser encarados como "minérios artificiais", e sua "exploração" (reciclagem).

A metodologia proposta teve como estudo de caso os resultados dos estudos de reciclagem para dois resíduos gerados em uma empresa de produtos trefilados, Torta da Estação de Tratamento de Efluentes e Carepa, aqui definidos como subprodutos. Os trabalhos foram desenvolvidos através dos estudos de tratamento baseando-se no seu potencial de reciclagem e, assim, contribuir como mais uma medida mitigadora para o impacto ambiental causado por muitos dos resíduos sólidos gerados.

Os resultados desta pesquisa estão em consonância com as diretrizes apresentadas pela *Agenda 21* (capítulo 20) onde é destacado sobre a ausência/deficiência no sistema de controle de resíduos sólidos industriais perigosos ou não perigosos. O manuseio e a destinação final inadequados criam problemas a longo prazo, envolvendo altos custos ambientais e comprometendo a qualidade da atmosfera, dos recursos hídricos e terrestres, com sérias implicações na saúde e na produtividade humana<sup>(6)</sup>.

## **2 - OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS**

A revisão bibliográfica apresenta diversas abordagens e diferentes sistemas de tratamento de resíduos sólidos industriais.

Os resíduos sólidos são originados de operações, processos e/ou atividades que, a princípio, mostram-se bastante semelhantes de uma indústria para outra. Porém, na maioria das vezes, os resíduos podem apresentar variações físicas e químicas significativas para uma mesma fonte geradora e, logicamente, para fontes distintas.

Independentemente do tipo de tratamento (químico, físico ou biológico), este depende fortemente das características da fonte geradora e, principalmente, da caracterização físico-química do resíduo.

Uma rota tecnológica pode ser aplicável para um resíduo específico de fontes distintas. Contudo, um sistema de tratamento depende fortemente das propriedades do material a ser tratado, tomando necessário modificar, ajustar e aprimorar seus processos unitários para cada resíduo semelhante e distinto, transformando-o em diferentes estudos de caso.

Neste aspecto, a presente proposta de trabalho tem como objetivos:

- pesquisa e revisão bibliográfica sobre o assunto;
- identificação e desenvolvimento de uma metodologia para reciclagem de resíduos sólidos;
- interação das indústrias com as instituições dedicadas à pesquisa tecnológica;
- caracterização do potencial de reciclagem, sob o ponto de vista técnico e econômico;
- formação e capacitação técnica para desenvolver estudos e projetos na área de reciclagem;
- apresentação dos ganhos ambientais, sociais e econômicos com a implantação dos sistemas de reciclagem de resíduos sólidos.

### 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, serão abordados inicialmente os conceitos básicos sobre resíduos sólidos apresentados pelas leis e normas ambientais vigentes e pelas agências regulamentadoras. A seguir, é apresentada a revisão bibliográfica sobre os sistemas de tratamento de resíduos sólidos do setor minero-metalúrgico visando sua reciclagem.

#### 3.1 - Conceitos e Sistemas

O conceito geral de resíduos sólidos (ou lixos) consiste em “restos das atividades humanas, considerados pelos geradores como inúteis, dispensáveis ou descartáveis”. Na atualidade, este conceito encontra-se em desuso, a “reciclagem” que é definida como “coleta, processamento, comercialização e uso de materiais considerados lixo” (Definição da EPA - *Environmental Protection Agency*)<sup>(6)</sup>.

##### 3.1.1 - Resíduos sólidos e tipos de resíduos

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR10004/87<sup>(7)</sup> são considerados resíduos sólidos industriais os resíduos em estado sólido e semi-sólido que resultam da atividade industrial, incluindo-se os lodos provenientes das instalações de tratamento de águas residuárias, aqueles gerados em equipamentos de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água, ou exijam, para isto, soluções economicamente inviáveis, em face da melhor tecnologia disponível.

Resíduos Sólidos Industriais, objeto da presente proposta, resultam dos processos das indústrias do setor minero-metalúrgico. Na indústria mineral, os resíduos sólidos são mais conhecidos como rejeitos, quando derivados das operações de beneficiamento, e como estéreis, quando resultam das operações de lavra. Na indústria metalúrgica/siderúrgica, os resíduos sólidos são também conhecidos como rejeitos, porém outros termos são utilizados: sucatas, descartes, lamas, pós, escórias, refugos, lixos, despejos, cinzas, etc..

Recursos Naturais compreendem aqueles meios de subsistência que as pessoas obtêm diretamente da natureza. São tradicionalmente classificados em recursos naturais não renováveis, tais como os recursos minerais e recursos naturais renováveis, como as florestas<sup>(2)</sup>. Dentre os recursos minerais, formados pela ação de agentes geológicos e fisiográficos na crosta terrestre, existem alguns cujo uso final praticamente descarta sua reciclagem, tais como os recursos energéticos (por exemplo: carvão e petróleo). Outros, como os recursos minerais metálicos, chumbo, ferro, zinco, cobre, alumínio, etc., permitem que os seus produtos e, em alguns casos, seus rejeitos, sejam reciclados.

A recuperação de recursos naturais não renováveis (isto é finitos) é uma das áreas onde o desenvolvimento tecnológico deve alcançar, em um futuro próximo, destaque e ampliação sempre crescentes.

Apesar de certos conceitos não serem ainda estabelecidos e aceitos de forma geral, a recuperação de recursos pode ser entendida como um conjunto de processos para a obtenção de materiais ou energia a partir de resíduos<sup>(2)</sup>. A prática de recuperação de recursos naturais não renováveis permite, além da extensão da vida de recursos existentes, uma diminuição considerável de impactos ao meio ambiente. A redução dos impactos se dá de diversas formas, desde a minimização de áreas de disposição de resíduos, passando pela minimização da poluição das águas. A lixiviação de resíduos sólidos pelo contato com águas meteóricas emite substâncias tóxicas às comunidades aquáticas as quais, via cadeia alimentar, podem atingir seres humanos. Por muito tempo, a pressão para que se verificasse a prática de reciclagem no caso dos recursos minerais foi apenas conservacionista. Presentemente, observa-se que as vantagens da reciclagem em larga escala vão muito além da conservação dos recursos não renováveis, tendo reflexos nítidos e muito positivos para a proteção do meio ambiente e para as questões econômicas.

Hoje, estes conceitos estão sendo modificados, o termo "resíduo" está caindo em desuso e sendo substituído pelo termo "subproduto", devido à possibilidade da reciclagem destes resíduos por parte da fonte geradora ou mesmo por outra empresa.

Um aspecto que tem merecido grande importância para as empresas consiste no processo de implantação do Sistema de Gestão Ambiental com as diretrizes apresentadas pelas normas da série ISO 14000 que abordam as questões ambientais. Desde 1993, as empresas estão preocupadas em adquirir o "Selo Verde", que foi primeiramente emitido pela Comissão Européia garantindo que o produto seja gerado dentro dos melhores padrões ecológicos possíveis. Cabe aos produtores se empenharem em conseguir o selo verde para seu produto, desde que atenda aos critérios técnicos, e cada vez mais se conscientizarem sobre a ecologia<sup>(8)</sup>.

Para fixar critérios para a concessão do selo, a intenção é sempre examinar o processo de produção considerando o impacto ambiental em cada fase: produção, distribuição, uso e descarte. Além disso, critérios mais subjetivos foram considerados, como a clareza nas instruções, durabilidade e reciclagem dos materiais<sup>(9)</sup>.

### Tipos de resíduos

Os resíduos podem ser categorizados de acordo com sua origem, composição química e sistema de destinação final, podendo ainda sofrer sub-classificações, ou seja, um resíduo de origem industrial pode ser ao mesmo tempo inerte, inorgânico e reutilizável como matéria-prima. A tabela III.1 apresenta uma visão de classificação de resíduos.

**Tabela III.1**

### **Classificação de resíduos sólidos<sup>(2)</sup>**

<b>Parâmetros de Classificação</b>	<b>Categorias e Tipos</b>
1 - Origem	agrícolas, industriais, comerciais, residenciais, hospitalares
2 - Nível de toxidez	inertes, radioativos, perigosos, não inertes
3 - Composição química	orgânicos, inorgânicos, metálicos, não metálicos
4 - Degradabilidade	biodegradáveis e não biodegradáveis
5 - Forma de reciclagem	recicláveis, não recicláveis, compostáveis, reutilizados como matéria-prima

### **3.1.2 - Manuseio de resíduos**

A minimização da geração de resíduos se constitui numa estratégia importante no gerenciamento de resíduos e se baseia na adoção de técnicas que possibilitem a redução no volume e/ou toxicidade dos resíduos e, conseqüentemente, de sua carga poluidora.

Independentemente das tecnologias selecionadas para o tratamento do resíduo, incluindo os sistemas de tratamento *"in situ"*, deve-se envolver a construção de sistemas de tratamento e estruturas de suporte, ou atividades reais para o processo de tratamento, a fim de minimizar os impactos ambientais.

O sistema de manuseio adequado é importante tanto para os resíduos perigosos, quanto para os resíduos sólidos e solos contaminados. Sem o devido sistema de manuseio dos resíduos, o tratamento requerido pode tornar-se mais difícil ou mesmo pouco eficaz.

A segregação dos resíduos dentro das indústrias e nos locais de tratamento ou disposição é de suma importância para o seu gerenciamento e tem como objetivos básicos: evitar a mistura de resíduos incompatíveis, contribuir para o aumento da "qualidade" dos resíduos que possam ser recuperados ou reciclados e diminuir o volume de resíduos perigosos a serem tratados e dispostos<sup>(8)</sup>.

Os seguintes fatores<sup>(4)</sup> devem ser levados em consideração para o manuseio dos resíduos: descrição do processo gerador, tipo e quantidade de material a ser tratado, formas de acondicionamento e armazenamento temporário, tecnologia a ser empregada, assim como as características físicas do local para a destinação final.

### **3.2 - Tecnologias de Tratamento de Resíduos Sólidos**

Considerando a tecnologia apropriada para emprego no sistema de tratamento de um determinado tipo de resíduo, o primeiro passo é classificá-lo, de acordo com a

legislação e a norma brasileira (NBR10004/87)<sup>(7)</sup> em inerte, não-inerte ou perigoso, ou segundo leis internacionais, em resíduo sólido perigoso ou resíduo sólido.

A *Resource Conservation and Recovery Act* - RCRA apresenta as seguintes definições para resíduos sólidos e resíduos perigosos<sup>(4)</sup> :

*Resíduo Sólido*  
(*Solid Wastes*) “... qualquer lixo, refugo, lama do tratamento de efluentes, água gerada pela planta de tratamento, ou material descartado do sistema de controle de poluição atmosférica, incluindo sólido, líquido, semi-sólido ou material gasoso resultante de operações industriais, comerciais, de mineração, agricultura e atividades da comunidade, mas não inclui materiais sólidos ou dissolvidos do sistema de tratamento de esgotos domésticos, ou materiais sólidos ou dissolvidos em retornos dos fluxos de irrigação ou descargas industriais... ou fontes de energia especial, ou subprodutos definidos pela *Atomic Energy Act* de 1954.”

*Resíduos perigosos*  
(*Hazardous Wastes*) “...um resíduo sólido, ou combinação de resíduos sólidos, que devido à sua quantidade, concentração, ou características físicas, químicas ou infecciosas pode:

- a) causar ou contribuir significativamente para um aumento da mortalidade ou um aumento de sérias doenças irreversíveis ou incapacidades reversíveis, ou;
- b) apresentar um composto substancial ou perigo potencial para a saúde da humanidade ou meio ambiente quando imprópriamente tratado, estocado, transportado ou depositado ou submetido a outro manejo.”

Observa-se que a definição de resíduos perigosos consiste em uma categoria especial de resíduos sólidos. Neste aspecto, resíduos perigosos são normalmente classificados como compostos orgânicos voláteis (VOC's) e compostos orgânicos semi-voláteis (SVOC's), metais, materiais contaminados por radioatividade ou uma mistura destes<sup>(4)</sup>.

Independentemente da categoria do resíduo, perigoso, não-inerte ou inerte, os tipos de tratamento usualmente aplicados são: tratamentos físicos, químicos, térmicos e biológicos e os métodos de disposição final.

No tratamento dos resíduos busca-se o desenvolvimento de um quadro de sistematização que correlacione as características dos resíduos com os métodos de tratamento e processamento dos mesmos. Este quadro contempla a adoção de operações unitárias e tecnologias tradicionalmente aplicáveis no tratamento de minérios e em processos industriais e adequação das mesmas para os resíduos.

### **3.2.1 - Processos físico-químicos**

Os tipos de tratamentos físico-químicos dependem fortemente das propriedades físicas do material a ser tratado, incluindo o estado da matéria, a solubilidade em água e em solventes orgânicos, a densidade, a volatilidade e os pontos de ebulição e de fusão.

O método de tratamento físico-químico pode ocorrer em três fases: primária, secundária e de polimento (acabamento), conforme mostra a figura 3.1.

A fase primária do tratamento é geralmente considerada como uma preparação inicial, embora possa resultar em redução na quantidade e periculosidade do resíduo. O tratamento secundário tem como objetivo destruir ou remover constituintes perigosos. A fase de polimento refere-se ao tratamento dos efluentes (seja atmosférico, líquido ou mesmo outro resíduo sólido) descartados do processo de tratamento, antes do seu lançamento no ambiente ou de serem recirculados.

A seguir serão apresentadas as principais operações e processos unitários aplicáveis aos resíduos sólidos, dependendo do seu aspecto físico: sólido, semi-sólido e líquido. Estas operações incluem:

- a) preparação do resíduo: britagem, moagem, classificação/peneiramento;
- b) fase de separação: filtração;
- c) fase de transição: secagem, destilação, evaporação e precipitação física;
- d) fase de transferência: extração, adsorção;
- e) separações moleculares por membranas: osmose reversa, hiper e ultrafiltração.

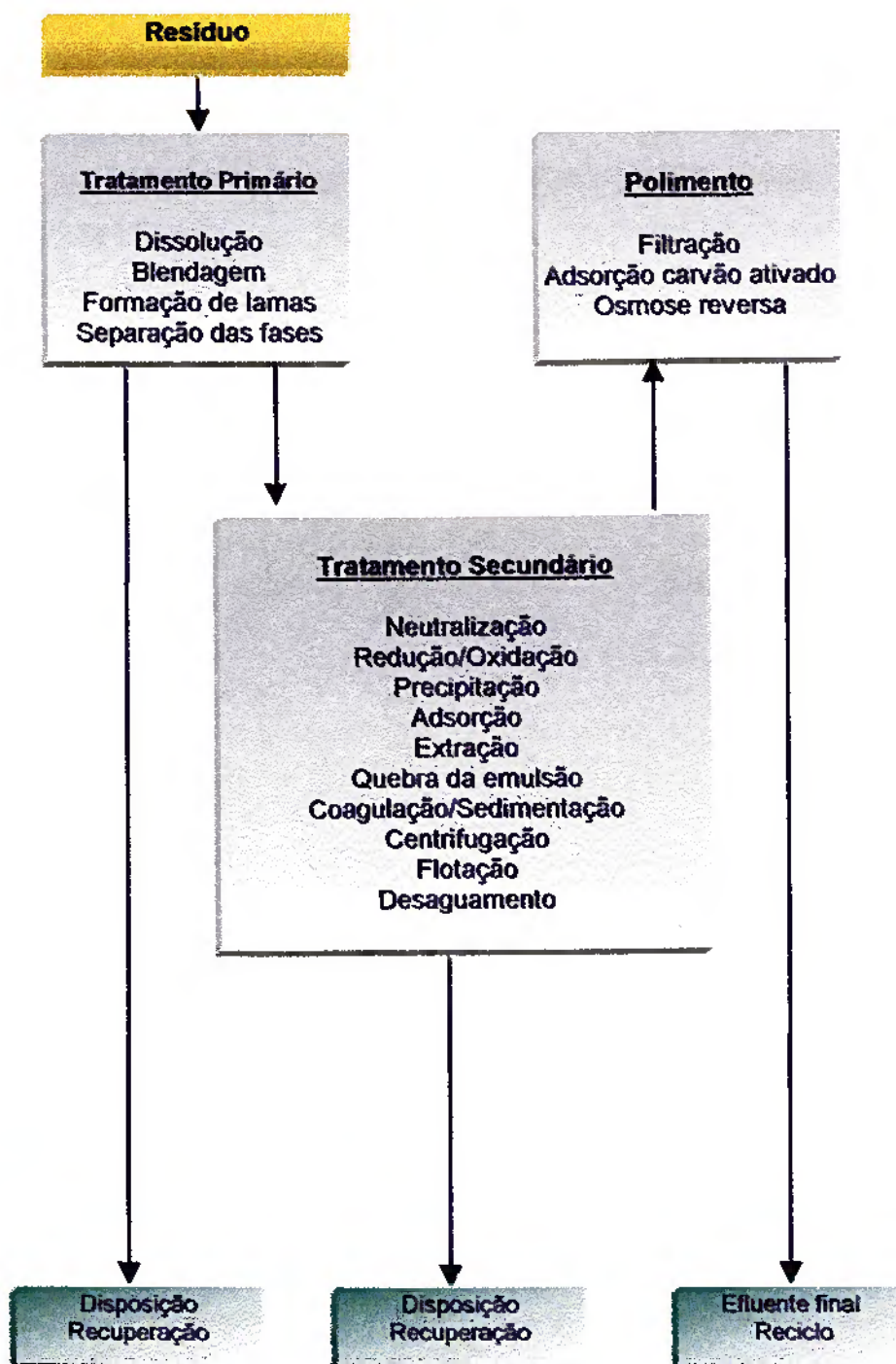


Figura 3.1

Principais fases no tratamento de resíduos: primária, secundária e polimento<sup>(10)</sup>

## **a) Preparação do resíduo sólido**

### *Britagem e moagem*

As operações de britagem e/ou moagem são aplicadas para os resíduos no estado sólido com o objetivo de liberar os seus constituintes para os processos subseqüentes de tratamento. Estas operações podem, ainda, ser aplicadas na desintegração dos resíduos no estado semi-sólido após a etapa de secagem.

### *Separação: peneiramento e classificação*

Separação é usada para dividir os resíduos em dois ou mais fluxos, baseados em tamanho, densidade ou tipo de material. A separação pode levar a um produto passível de reutilização direta.

Peneiramento é o técnica mais comum de separação disponível podendo ser realizada em grelhas tipo fixa e/ou vibratória. Os fatores que influenciam na separação são: disponibilidade e mobilidade do equipamento, tipo de material a ser manuseado, volume do resíduo, facilidade na limpeza, manutenção e descontaminação dos equipamentos, taxa de alimentação requerida e tipo de peneiramento a úmido ou a seco.

## **b) Fases da separação**

O método mais usual de separação dos componentes da mistura em duas diferentes fases é uma seqüência de sedimentação e decantação, operações que na maioria das vezes são auxiliadas pelos mecanismos de filtração ou centrifugação.

Nos casos industriais onde ocorre grande geração de resíduo utiliza-se o processo de desaguamento, que consiste na remoção ou redução da umidade contida no material, usualmente como uma etapa anterior a outra tecnologia para reciclagem das lamas e lodos. As vantagens do desaguamento são: facilidade de manuseio, redução no volume de material e redução significativa do custo de energia no sistema de

tratamento do resíduo, devido à remoção da água<sup>(11)</sup>. Na prática o processo desaguamento pode ser obtido através de espessamento, centrifugação, filtração a vácuo e sedimentação em lagoas.

Um agente de difícil controle, detectado nos tratamentos de resíduos, consiste na quebra de uma dispersão, ou seja a necessidade de se agregar e sedimentar partículas de tamanho-coloidal presentes nas suspensões. Esta etapa é desenvolvida a partir de agitação, aquecimento, acidulação e adição de coagulantes (substâncias inorgânicas) ou floculantes (substâncias orgânicas).

### **c) Fase de transição**

A fase de transição consiste na mudança do material de uma fase para outra, como por exemplo a etapa de 'destilação' usada no tratamento e reciclagem de solventes, óleos usados, efluentes fenólicos, xilenos contaminados com parafina e misturas de etil-benzeno e estireno<sup>(10)</sup>. Contudo, o processo de destilação resulta na geração de destilado de fundo, que é caracterizado como um resíduo classe I - perigoso.

Outro processo da fase de transição é a 'evaporação', que é empregada para remover água do resíduo aquoso e concentrá-lo. Um caso especial desta técnica é a evaporação do filme pouco espesso, em que os constituintes voláteis são removidos pelo aquecimento da camada fina do resíduo líquido ou da lama.

A 'secagem' é a operação mais importante tendo em vista que a água é um dos constituintes característicos dos resíduos. A operação consiste na remoção de solvente ou água da lama sólida ou semi-sólida ou a remoção do solvente do líquido ou suspensão, reduzindo-se assim a quantidade do resíduo, o grau de interferência da água/solvente com as etapas posteriores de tratamento e a concentração dos constituintes voláteis perigosos.

'*Stripping*' é um meio de separação de componentes voláteis de outros menos voláteis em uma mistura líquida, através da partição dos materiais mais voláteis para a fase gasosa do ar ou vapor, operação efetuada em torre de *stripping*. Os principais

tipos de produtos são o vapor condensado e o resíduo de fundo. Um exemplo deste processo é a separação entre benzeno e diclorometano<sup>(10)</sup>.

#### **d) Fase de transferência**

Esta etapa consiste na transferência do soluto em uma mistura de uma fase para outra<sup>(11)</sup>. O mais importante processo é a 'extração por solvente'. Neste processo ocorre a remoção de determinadas substâncias de um resíduo por meio de sua passagem através de um solvente, no qual sejam solúveis. É utilizado principalmente na recuperação de metais como cobre, zinco, urânio e terras-raras, presentes nos líquidos oxigenados do processamento de minérios.

Esta técnica pode, teoricamente, ser aplicada para qualquer poluente, desde que seja utilizado um solvente adequado no qual somente aquele poluente específico seja solúvel e que não existam interferentes.

Outra técnica muito utilizada é a 'adsorção' que se baseia na fixação dos átomos ou ions de um gás ou líquido na superfície de um sólido<sup>(8)</sup>. O adsorvente mais usado no tratamento de resíduos<sup>(12)</sup> é o carvão ativado, podendo ser usado como etapa preliminar ao processo através da osmose reversa, a fim de melhorar a eficiência e evitar a formação de incrustação. A adsorção por carvão é utilizada como polimento após o tratamento biológico de efluentes. A aplicação de carvão ativado é mais eficaz na remoção de componentes insolúveis na água e com elevada massa molecular, tais como xileno, naftaleno, hidrocarbonetos clorados, anilina, corantes e surfatantes. Outros adsorventes usados são as resinas sintéticas e substâncias minerais (argilas).

#### **e) Separação molecular por membranas**

A separação molecular<sup>(12)</sup> é baseado no processo de separação por membrana, envolvendo a filtração a nível molecular, onde os contaminantes dissolvidos ou solventes passam através de uma membrana (geralmente de policarbonatos ou vermiculita hidrofobizada) com tamanho seletivo, sob pressão. Os produtos consistem na água altamente purificada e um concentrado enriquecido com as impurezas. A

hiperfiltração permite a passagem de espécies com massa molecular da ordem de 100 a 500, enquanto que a ultrafiltração é usada na separação de solutos orgânicos com massa molecular da ordem de 500 a 1.000.000, podendo ser aplicada no tratamento de íons complexos de metais pesados.

A 'osmose reversa' é outra técnica amplamente utilizada em sistemas aquosos<sup>(11)</sup>. Embora a grande semelhança com a ultrafiltração/hiperfiltração, o princípio da osmose reversa consiste numa membrana seletivamente permeável para água e exclui os solutos iônicos, sob alta pressão, produzindo um concentrado contendo altos níveis de sais dissolvidos.

A 'eletrodialíse'<sup>(11)</sup> é usada algumas vezes para concentrar resíduos ácidos, principalmente de tratamentos superficiais, empregando membranas de troca iônica e uma força motriz eletrolítica, produzindo a água purificada e uma salmoura (resíduo).

### **3.2.2 - Processos químicos**

A aplicabilidade dos processos químicos a resíduos depende das características dos constituintes do resíduo, particularmente basicidade/acidez, oxidação/redução, precipitação e comportamentos de compatibilidade, tais como: reatividade, inflamabilidade, combustibilidade, corrosividade e a compatibilidade com outros resíduos. As operações unitárias baseadas em propriedades químicas e reações são:

- a) neutralização;
- b) extração e lixiviação química;
- c) redução;
- d) precipitação química;
- e) oxidação/redução;
- f) troca iônica.

A seguir é apresentada uma breve descrição das operações unitárias.

### a) Neutralização

Os resíduos ácidos e alcalinos são tratados pela neutralização conforme apresenta a reação 1, pelo simples princípio:



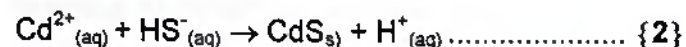
Um dos principais agentes de neutralização de resíduos ácidos é a cal,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , devido à sua solubilidade limitada.

Para os resíduos alcalinos, o ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) é extremamente aplicado devido a seu baixo custo, porém apresenta a desvantagem de produzir soluções altamente ácidas. A fim de minimizar este efeito, em muitos casos, aplica-se o ácido acético, por ser um ácido fraco, pouco nocivo, biodegradável no meio ambiente.

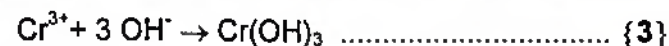
A etapa de neutralização ajusta o valor do pH da solução entre 6-9, sendo aplicada nas fases preliminares dos processos de oxidação/redução,  $\text{CO}_2$ , troca iônica, adsorção por carvão ativado, dentre outros.

### b) Precipitação química<sup>(4,10)</sup>

O processo de precipitação química é usado no tratamento de resíduos perigosos, primeiramente para a remoção de íons de metais pesados da água, como mostra a reação 2.

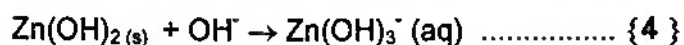


A forma mais comum de precipitação de metais é através da formação de hidróxidos, tais como a reação 3 para o hidróxido de cromo III.



A fonte do íon hidroxila é uma base, como por exemplo: cal, hidróxido de sódio ou carbonato de sódio. Muitos íons metálicos tendem a produzir precipitados de sais básicos, tais como sulfato de cobre II,  $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$ , formando um sólido. A solubilidade dos hidróxidos de metais pesados atinge um valor mínimo,

freqüentemente na faixa de pH entre 9 e 11, aumentando com o aumento do valor do pH devido a formação de hidróxi-complexos solúveis, como mostra a reação 4.



Outros agentes de precipitação química são os carbonatos e os compostos de enxofre. Os carbonatos não produzem elevados valores de pH, enquanto que os compostos de enxofre, por exemplo  $\text{H}_2\text{S}$  ou outros sulfetos, são bastante eficazes, porém podem provocar impactos ambientais por se tratar de produtos com potencial de periculosidade.

### c) Oxidação - redução

O termo oxidação significa, originalmente, uma reação na qual o oxigênio se combinava quimicamente com outra substância. Com o uso passou a ser associado de maneira mais abrangente a toda reação na qual ocorre liberação de elétrons, que são consumidos na redução. A oxidação e a redução sempre ocorrem simultaneamente e o agente oxidante é aquele que ganha elétrons<sup>(6)</sup>.

As reações de oxidação/redução apresentadas na tabela III.2 podem ser usadas no tratamento e remoção de compostos inorgânicos e orgânicos dos resíduos.

**Tabela III.2**

**Reações de oxidação-redução usadas no tratamento de resíduos<sup>(12)</sup>**

Resíduo	Reações com agentes oxidantes ou redutores
Oxidação de orgânicos	
Matéria orgânica ( $\text{CH}_2\text{O}$ )	$\{\text{CH}_2\text{O}\} + \{\text{O}\} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
Aldeído	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{O} + \{\text{O}\} \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH}$ (ácido)
Oxidação de inorgânicos	
Cianeto	$2\text{CN}^- + 5\text{OCl}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2 + 2\text{HCO}_3^- + 5\text{Cl}^-$
Ferro II	$4\text{Fe}^{2+} + \text{O}_2 + 10\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{Fe(OH)}_3 + 8\text{H}^+$
Dióxido de enxofre	$2\text{SO}_2 + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2\text{SO}_4$
Redução de inorgânicos	
Cromato	$2\text{CrO}_4^- + 3\text{SO}_2 + 4\text{H}^+ \rightarrow \text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 + 2\text{H}_2\text{O}$
Permanganato	$\text{MnO}_4^- + 3\text{Fe}^{2+} + 7\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MnO}_2(\text{s}) + 3\text{Fe(OH)}_3 + 5\text{H}^+$

#### d) Eletrólise

A eletrólise é um processo que permite a recuperação de espécies metálicas em solução<sup>(10)</sup>. Para tanto é necessário que se estabeleça uma corrente elétrica entre dois eletrodos. O metal a ser recuperado deposita-se no eletrodo negativo. Esse método requer que os resíduos tratados sejam “puros”, isto é, que não existam elementos que interfiram no processo de deposição. O processo é aplicado para recuperação de cádmio, chumbo, zinco, ouro, prata e cobre presentes nos resíduos.

#### e) Hidrólise

Um dos aspectos para aplicação de processos químicos envolvendo reações com a água é permiti-los reagir em condições controladas através da hidrólise<sup>(10)</sup>. Produtos químicos inorgânicos que podem ser tratados por hidrólise são: metais, carbeto de metais, hidretos e haletos e sulfetos de não metais, conforme apresenta a tabela III.3.

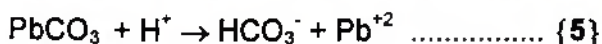
**Tabela III.3**

**Resíduos químicos inorgânicos que podem ser tratados através de hidrólise<sup>(10)</sup>**

Componentes	Reações Químicas
Metais	$\text{Ca} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2$
Hidretos (Hidreto de sódio e alumínio)	$\text{NaAlH}_4 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}_2 + \text{NaOH} + \text{Al}(\text{OH})_3$
Carbetos (Carbeto de cálcio)	$\text{CaC}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2$
Haletos (Tetracloreto de silício)	$\text{SiCl}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SiO}_2 + 4\text{HCl}$
Alcóxidos (Etóxido de sódio)	$\text{NaOC}_2\text{H}_5 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NaOH} + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$

#### f) Extração química e lixiviação

Extração química e lixiviação para tratamento de resíduos perigosos consiste na remoção dos constituintes perigosos através de reação química com um extratante em solução. Sais de metais pesados fracamente solúveis podem ser extraídos através da reação dos ânions dos sais com íons  $\text{H}^+$ , como mostra a reação 5.



Extração com ácidos pode ser evitada se cianetos e sulfetos estiverem presentes para impedir a formação de cianeto de hidrogênio ou sulfeto de hidrogênio. Ácidos fracos não tóxicos são usualmente os mais seguros para uso, como por exemplo: ácido acético e os sais ácidos<sup>(10)</sup>.

Agentes quelantes, tais como EDTA (etileno-dinitrilo-tetra-acetato) dissolvem sais de metais insolúveis através da formação de espécies solúveis com os íons metálicos.

Os íons de metais em solos contaminados por resíduos perigosos podem estar presentes na co-precipitação formando óxidos de ferro III e manganês IV. Estes óxidos podem ser dissolvidos através de agentes redutores, tais como soluções de ditionato de sódio ou hidroxalamina, resultando na produção de  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Mn}^{2+}$  e liberando íons de metais pesados tais como  $\text{Cd}^{2+}$  ou  $\text{Ni}^{2+}$ , os quais são removidos com a água.

#### **g) Troca iônica**

O processo de troca iônica<sup>(10)</sup> consiste na passagem de um efluente através de um leito de resina, cujo objetivo é a troca de certos contaminantes iônicos presentes no efluente por íons menos agressivos presentes na resina. A resina pode ser regenerada através de tratamentos com ácidos, bases ou sais. A maior aplicabilidade da resina de troca iônica é no tratamento para remoção de baixos níveis de metais pesados dos esgotos sanitários.

### **3.2.3 - Processos térmicos**

Dentre os métodos de tratamento e destinação final de resíduos sólidos destacam-se:

- a) incineração;
- b) dessorção térmica;
- c) pirólise;
- d) vitrificação;
- e) co-processamento;
- f) autoclavagem.

## a) Incineração

A incineração<sup>(11)</sup>, considerada por alguns como forma de disposição final, é um método de tratamento que se utiliza da decomposição térmica via oxidação, com o objetivo de tornar um resíduo menos volumoso, menos tóxico ou mesmo eliminá-lo.

Há muitos anos, o processo de incineração apresenta o enfoque voltado à queima de resíduos domiciliares e patogênicos. Hoje, este processo vem sendo aplicado para resíduos perigosos (classe I) e não inertes (classe II), tendo em vista os problemas ambientais decorrentes das formas inadequadas de disposição, falta de espaço disponível para várias indústrias, além do fato de criar o passivo ambiental, mesmo em condições adequadas de disposição.

Idealmente, os resíduos incineráveis são os resíduos orgânicos que se queimam com o valor de no mínimo 2.780 kcal/kg e preferencialmente acima de 4.448 kcal/kg<sup>(11)</sup>. Estes valores são obtidos para os resíduos contendo metanol, acetonitrilo, tolueno, etanol, amil acetato, acetona, xileno e metil-etil-cetona. Outros resíduos que não apresentam a propriedade de inflamabilidade e combustibilidade, porém com poder calorífico inferior (PCI) maior que 4.700 kcal/kg, podem ser incinerados, necessitando de combustível suplementar para realização da queima. A tabela III.4, a seguir, apresenta os valores aproximados do PCI para alguns tipos de resíduos.

O sistema de preparação do resíduo visando sua incineração é mostrado na figura 3.2.

As unidades de incineração variam de pequenas instalações, projetadas e dimensionadas para um resíduo específico, até grandes instalações para incineração de diferentes fontes. A temperatura de combustão encontra-se na faixa de 1200°C a 1400°C, com o tempo de residência variável para cada tipo de resíduo. No caso de materiais tóxicos e perigosos, as instalações requerem equipamentos adicionais de controle de poluição do ar e, conseqüentemente, implicam em custos adicionais<sup>(11)</sup>.

Tabela III.4

Valores aproximados de PCI de diferentes produtos e resíduos<sup>(10,11,12)</sup>

PRODUTOS	PCI	
	LÍQUIDOS E SÓLIDOS (kcal/kg)	GÁS (kcal/Nm <sup>3</sup> )
<b>Combustíveis Líquidos ou Gasosos</b>		
hidrogênio	28.900	2.580
metano	11.960	8.560
etano	11.340	15.230
propano	11.080	21.800
acetileno	11.540	13.400
metanol	4.800	-
etanol	6.420	-
<b>Combustíveis Sólidos</b>		
antracito	8.500	-
grafite	7.840	-
coque	7.000	-
<b>Combustíveis Sólidos</b>		
lignito	6.500 - 8.000	-
turfa	3.000 - 4.000	-
xisto betuminoso	600 - 2.000	-
<b>Resíduos e Subprodutos</b>		
resíduos de acetona	4.500 - 10.000	-
resíduos de benzeno	9.600	-
soluções aquosa orgânicas	600 - 800	-
resíduos de pintura	4.500	-
graxas residuárias	5.800	-
asfalto	9.500	-
licor residuário de refinarias	1.900 - 2.000	-
lama de hidrocarbonetos	6.000 - 8.000	-
lamas de graxas siderúrgicas	2.000 - 3.000	-
polietileno/poliestireno	10.500	-
polivinilclorinato	4.500 - 4.800	-
poliuretano	4.450	-

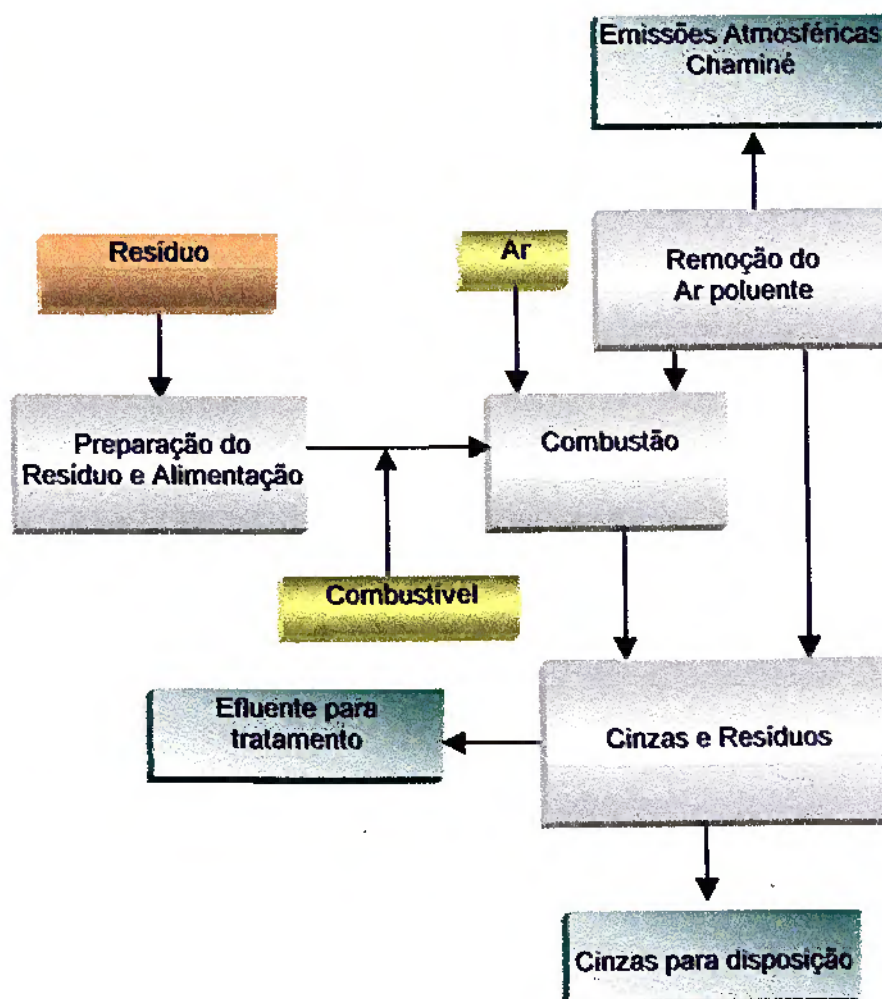


Figura 3.2

Principais componentes no sistema de incineração de resíduos<sup>(10)</sup>

Pelo processo de incineração, remove-se a toxicidade dos resíduos perigosos através da destruição dos compostos orgânicos, redução do volume e conversão de resíduos líquidos em sólidos por evaporação. Predominantemente, a incineração é usada para a destruição dos compostos VOC's e SVOC's. A eficiência de remoção é apresentada em 99,9999%, porém controvérsias sobre esta eficiência vêm sendo discutidas e analisadas<sup>(4)</sup>.

A eficácia de um incinerador depende de três fatores básicos<sup>(4,11)</sup>: temperatura da câmara de combustão, tempo de residência na câmara e quantidade da mistura de material com ar enquanto na câmara.

A temperatura de combustão normal encontra-se entre 900 e 1.500°C<sup>(10,11)</sup> e, em alguns instantes, em valores muito mais elevados. Muitos incineradores empregam duas câmaras de combustão, na primeira câmara convertem-se os compostos em gases e inicia-se o processo de combustão e na segunda completa-se a combustão dos gases.

Parte dos resíduos permanece como cinzas após a incineração. Para os resíduos líquidos, a quantidade de cinzas remanescente é praticamente insignificante, enquanto que, para os resíduos sólidos, o volume de cinzas é reduzido a cerca de 30% do volume inicial. Caso as cinzas apresentem constituintes metálicos e/ou radioativos estes deverão ser tratados antes de sua disposição final, através de solidificação/estabilização.

Existem no mercado diversos tipos de incineradores sendo os mais comuns os fornos rotativos, por serem capazes de tratar os resíduos sólidos e líquidos. O incinerador de forno rotativo apresenta uma carcaça cilíndrica com o eixo inclinado. Os incineradores de injeção de resíduos líquidos alimentam o material sob alta pressão através do bico que atomiza os resíduos. Este fornece ar para a mistura, possibilitando assim o processo de combustão.

Já os resíduos sólidos ou líquidos podem ser tratados no incinerador de leito fluidizado em uma camada de material inerte suspenso sobre o fundo do leito fluidizado. Parte da cinza permanece após a combustão, sendo removida quando a camada é trocada.

Um dos mais recentes tipos de incineração envolve radiação por infravermelho, podendo ser usado para resíduos sólidos e líquidos, desde que haja uma preparação da mistura com areia mais líquido antes da alimentação na câmara. Este sistema

utiliza uma haste de carbeto de silício aquecida eletricamente para levar o resíduo à temperatura de combustão na primeira câmara de combustão.

Apesar do processo de incineração ser considerado um método muito eficaz para o tratamento de resíduos orgânicos, sua aplicação encontra-se em declínio, tendo em vista a pressão exercida pelas comunidades e órgãos ambientais, devido às características das emissões atmosféricas que atingem suas redondezas.

### **b) Dessorção térmica**

O processo de dessorção térmica<sup>(10)</sup> consiste no aquecimento de um resíduo em um ambiente controlado, desse modo volatilizando parte dos constituintes orgânicos, sejam VOC's e SVOC's. A eficiência do processo é avaliada entre 65 e 99 %, dependendo das características do resíduo.

O processo exige uma preparação anterior do resíduo através do sistema de peneiramento, a fim de remover as partes mais grosseiras e o excesso de umidade contida no resíduo.

Os resíduos são alimentados num forno que opera a temperatura na faixa de 300 - 600°C. Os compostos orgânicos gasosos volatilizam e são coletados em um meio de carvão ativado e posteriormente tratados antes do lançamento na atmosfera ou são enviados para outro incinerador conectado em linha com o equipamento do processo de dessorção térmica.

A vantagem do sistema de dessorção térmica é apresentar um menor consumo de energia, se comparado com o incinerador convencional, e causar menores riscos de poluição.

### **c) Pirólise**

Segundo a literatura<sup>(10)</sup>, o processo de pirólise consiste na transformação do resíduo provocada pela ação do calor. A diferença em relação à incineração convencional

consiste no processo de combustão direta com a chama na presença do gás oxigênio. A pirólise pode ser obtida como uma destilação destrutiva na ausência de oxigênio ou de outro agente oxidante.

O processo converte resíduos contendo compostos voláteis (VOC's e SVOC's) em gases combustíveis, líquidos orgânicos, carvão vegetal e resíduos de cinzas de metais. A fração líquida produzida durante a reação de pirólise apresenta potencial para formar a base de cru sintético e um gás não perigoso aos trabalhadores.

A eficácia do processo de pirólise depende de:

- tempo de residência na retorta;
- razão de elevação da temperatura;
- temperatura final;
- constituição do material alimentado.

As unidades de pirólise operam na faixa de temperatura entre 500 e 800°C, apresentando a eficiência de 99,9999 % da destruição/remoção e a redução do volume acima de 50 %.

#### **d) Vitrificação** <sup>(11,12)</sup>

O processo de vitrificação pode ser aplicado para os resíduos orgânicos e inorgânicos "*in situ*" ou "*ex situ*", podendo-se classificá-la como uma tecnologia de remediação<sup>(12)</sup>.

Na situação "*in situ*", o processo de vitrificação é bastante semelhante ao processo de fabricação de vidros, no qual um eletrodo é utilizado para fundir os resíduos. Os compostos orgânicos são transformados através da pirólise, coletados e destruídos em um processo secundário. Já os compostos inorgânicos são imobilizados resultando em uma matriz de vidro<sup>(11,12)</sup>.

Na vitrificação "*in situ*" é envolvida a inserção de grande quantidade de eletrodos no solo<sup>(11,12)</sup>. Grafita é distribuída sobre a superfície do solo entre os eletrodos para completar o circuito, sendo aplicada uma pressão negativa para coleta dos gases seguida de tratamento posterior. O processo é realizado sob uma elevada voltagem através dos eletrodos e temperatura de 3.600°C.

Nas aplicações "*ex situ*", os resíduos são alimentados em um forno juntamente com sílica, soda e cal. Os compostos orgânicos são exauridos, coletados e tratados e os compostos inorgânicos são incorporados na matriz de vidro<sup>(11,12)</sup>.

Uma das maiores aplicações do processo de vitrificação é para os resíduos com constituintes radioativos.

#### **e) Queima em fornos industriais**

Segundo a definição da CETESB<sup>(11)</sup> fornos industriais são os dispositivos fechados que se utilizam de chama de combustão controlada para recuperar ou produzir materiais ou energia, como um componente integrante do processo de fabricação.

Dentre esses dispositivos, incluem-se basicamente os seguintes tipos:

- fornos de cimento;
- fornos de cal;
- fornos de coqueria;
- altos-fornos;
- fornos de fusão e refino;
- fornos para agregados (inclusive fornos para secagem de agregados usados nas indústrias de concreto asfáltico).

A opção para incineração de resíduos em fornos industriais tem surgido devido à vantagem da não necessidade de investimento de capital em novos equipamentos, implicando na diminuição dos custos. Entretanto, a alimentação de resíduos pode interromper o processo produtivo ou reagir com o produto, ou ainda gerar a necessidade de equipamentos adicionais de controle de emissões gasosas.

A tabela III.5 mostra alguns processos alternativos de incineração e suas variações operacionais típicas.

**Tabela III.5**

**Processos alternativos de incineração e suas variações operacionais típicas<sup>(11)</sup>**

<b>Tipo de Indústria</b>	<b>Processo - Equipamento</b>	<b>Faixa de Temperatura (°C)</b>	<b>Tempo de Residência (em segundos)</b>
Diversas Caldeiras	fogo tubular	1000 - 1400	0,1 - 0,5
	água tubular	900 - 1300	0,3 - 0,2
	carvão pulverizado	1000 - 1300	0,9 - 4,0
Cimento	forno de cimento rotativo	1400 - 2000	6,0 - 10,0
Cal	forno rotativo	700 - 1800	6,0 - 10,0
Ferro e Aço	alto-forno	1200 - 1800	2,0

Além destes fornos, uma empresa do setor mineral vem avaliando a possibilidade de reativar seu forno de fusão - Forno Waelz, com os objetivos de aumentar a recuperação do zinco contido no minério, assim como recuperar os metais pesados contidos em alguns tipos de resíduos siderúrgicos.

Segundo a literatura<sup>(11)</sup>, os fornos industriais utilizados para queima de resíduos são os fornos da indústria de cimento e cal. A queima de grande parte dos resíduos em fornos de clínquerização apresenta a vantagem de não produzir qualquer tipo de cinza ou efluente líquido. O que seria cinza retorna ao processo de produção de clínquer como matéria-prima e os gases, que gerariam efluentes líquidos ácidos, após sua lavagem, são absorvidos pela farinha de cimento, que é altamente alcalina, provocando sua neutralização. Outra vantagem é referente aos resíduos com elevado poder calorífico acarretando redução do consumo de combustíveis.

No Estado de São Paulo, a CETESB tem licenciado indústrias do setor cimenteiro a realizar testes nos fornos de cimento para queima de resíduos de indústrias de diversos setores industriais, como terras diatomáceas contaminadas com óleo, lama

de estação de tratamento de efluentes, borra de decantadores e outros. A licença ambiental é concedida para a incineração de resíduos em fornos de cimento caso a caso, resíduo por resíduo, forno por forno. Este mesmo procedimento tem sido trilhado nos Estados Unidos onde 29 fábricas de cimento já realizam a incineração de resíduos industriais e outras 30 haviam pleiteado licença junto à agência ambiental EPA - *Environment Protection Agency* (Dados da Gazeta Mercantil 28/07/93).

A incineração de resíduos em fornos industriais dependerá da capacidade dos equipamentos de cada produtor de cimento e de sua adequação às exigências legais dos padrões de lançamento das emissões atmosféricas, tipos de resíduos, e também dos métodos de tratamento durante o manuseio dos resíduos.

#### **f) Autoclavagem<sup>(12)</sup>**

O processo de autoclavagem consiste no tratamento de resíduos biomédicos e bioperigosos, principalmente resíduos gerados em hospitais e laboratórios, antes da disposição em aterros sanitários especiais. A autoclavagem ocorre numa câmara à temperatura da ordem de 120°C e pressão de 15 psi, durante o tempo de 25 minutos, resultando na destruição de microrganismos e desinfecção dos materiais.

### **3.2.4 - Tratamentos biológicos**

Os métodos de tratamento biológico para os resíduos perigosos e sólidos (não inerte) são: biorreatores, biorremediação na fase sólida, pilha de sólidos, compostagem e biorremediação *"in situ"*.

#### **a) Biorreatores**

Atualmente, os biorreatores apresentam-se como o método fundamental para tratamento de efluentes sanitários. Os resíduos são misturados com a biomassa dos microrganismos no reator que metaboliza os componentes orgânicos solúveis, podendo ou não serem adicionados nutrientes e oxigênio, ou seja, emprego do tratamento aeróbico<sup>(12)</sup>.

Os reatores podem ser tanto em filme fixado ou em lodo<sup>(12)</sup>, podendo operar em regime de batelada ou contínuo. Reatores em filme fixado são similares aos filtros tradicionais ou *Rotating Biological Contactors* (RBC's) de efluentes industriais. Em muitos casos, os microrganismos são mantidos nos meios filtrantes.

A eficiência do tratamento depende da concentração de resíduos, tempo de contato com os microrganismos, oxigênio disponível e temperatura do reator.

#### **b) Biorremediação da fase sólida**

O processo de biorremediação<sup>(11)</sup>, mais conhecido como *Landfarming*, consiste no tratamento dos resíduos sobre o solo para garantir a degradação microbiológica dos resíduos. Os resíduos são depositados diretamente sobre o solo ou em tanques rasos. Os nutrientes e os microrganismos são normalmente adicionados no próprio resíduo sendo rotineiramente cultivados com o processo do tratamento. Este cultivo melhora a aeração e o contato dos resíduos com os microrganismos.

#### **c) Pilha de sólidos**

Os resíduos são depositados em pilhas de vários metros de altura sobre o piso impermeabilizado. Os nutrientes, microrganismos e ar são fornecidos através de dutos instalados ao longo da pilha. As pilhas são cobertas para conter os VOC's, para estabilizar o meio ambiente dos microrganismos e controlar a erosão do solo<sup>(12)</sup>.

#### **d) Compostagem**

O processo de compostagem<sup>(13)</sup> é caracterizado pela degradação aeróbica e termofílica de resíduos e lodos orgânicos sob condições controladas. Essa degradação é feita por populações de microrganismos, que utilizam o carbono da matéria orgânica para obter energia, e o resultado final é o chamado composto, que nada mais é do que matéria orgânica parcialmente estabilizada e de lenta decomposição, quando em condições favoráveis.

Durante a compostagem ocorrem duas fases distintas, estabilização e maturação. A primeira fase é termofílica e a temperatura pode atingir até 70°C, devido à atividade

microbiana. A segunda fase se caracteriza por uma diminuição da temperatura até atingir a temperatura ambiente, quando ocorre uma lenta degradação por parte da matéria orgânica remanescente<sup>(13)</sup>.

O processo de compostagem apresenta a vantagem em relação aos outros processos de tratamentos biológicos, principalmente quando se trata de estabilização de lodos. Por ser um processo aeróbico, não há formação de gases de odor desagradável durante a degradação biológica e, por ser um processo onde a temperatura permanece por um longo período acima de 50°C, vários microorganismos patogênicos são inativos. Durante o processo ocorre também uma grande redução de volume e teor de umidade, em relação ao resíduo e teor de umidade, facilitando o armazenamento, transporte e disposição final.

O composto resultante pode ser usado em atividades agrícolas e florestais como fonte de matéria orgânica, tão escassa em solos tropicais cultivados. Os benefícios do uso de composto consistem no tempo de retenção de água, melhor acondicionamento físico do solo e aumento da produção vegetal.

#### **d) Biorremediação “*in situ*”<sup>(12)</sup>**

A grande vantagem do método de tratamento por remediação “*in situ*” é a aplicabilidade do tratamento no próprio local. O processo usualmente se vincula com a alimentação de nutrientes, microrganismos e ar para o solo/resíduo através de uma série de poços de injeção ou trincheiras de infiltração. Se o solo não apresenta umidade suficiente, deve-se adicionar água.

### **3.3 - Resíduos Sólidos Gerados no Setor Industrial do Estado de Minas Gerais**

A tabela III.6 apresenta um resumo da situação atual do reaproveitamento dos resíduos sólidos gerados pelos principais setores industriais do Estado de Minas Gerais. Na tabela, aqui apresentada, observa-se que os setores metalúrgicos, siderúrgicos e de mineração apresentam variações qualitativas de resíduos,

ressaltando-se o objeto da presente proposta: a necessidade de se conhecer e estudar tais resíduos.

**Tabela III.6**

**Sugestões para reciclagem dos resíduos sólidos gerados pelos principais setores industriais do estado de Minas Gerais<sup>(14)</sup>**

<b>INDÚSTRIAS DO SETOR METALÚRGICO/SIDERÚRGICO E MINERAÇÃO</b>	
<b>Resíduos sólidos gerados</b>	<b>Sugestões para destinação final</b>
cabos de aço	indústrias de fundição
cabos de alumínio com alma de aço	indústrias de fundição
cabos de alumínio isolados	indústrias de fundição
cabos de cobre isolados	indústrias de fundição
cavaco de cobre/latão	reciclagem de bronze e do latão
fios e arames de cobre	reaproveitamento do cobre
sucatas de alumínio	reciclagem de alumínio
peças e conectores de bronze	indústrias de fundição
sucata de bronze	reciclagem de chumbo
sucata de cobre	reciclagem de cobre
sucata de ferro e ferro fundido	indústrias de fundição
areia de fundição	possibilidade para reaproveitamento em construção civil
borra de alumínio	recuperação do alumínio
borra de bronze	recuperação do chumbo
cal de carbureto	neutralização de efluentes, fabricação de argamassa, corretivo de solo
calcário semi-calcinado	construção civil, corretivo de solo, siderurgia
carepa de aço	substituição de hematita no alto-forno
carepa de laminação	indústrias de fundição
carepa de lingotamento contínuo	indústrias de fundição
casqueiro de bloco/granito	brita, calçamento, móveis rústicos
casqueiro de chapa polida/granito	aglomerado de piso
cinzas (Ca, Na, P, Fe, Al)	corretivo de solo, matéria-prima para fabricação de cimento
escória de alto-forno	fabricação de cimento, tijolos, cerâmica
escória de alto-forno de aciaria	corretivo de solo, pavimentação, fabricação de cimento
escória do forno LD	corretivo de solo, fabricação de cimento
finos de minério de ferro	sinterização, pelletização, injeção de finos nos altos-fornos

Continuação da Tabela III.6

<b>INDÚSTRIAS DO SETOR METALÚRGICO/SIDERÚRGICO E MINERAÇÃO</b>	
<b>Resíduos sólidos gerados</b>	<b>Sugestões para destinação final</b>
gesso agrícola	agricultura, indústria de cimento e pavimentação
grits/CaO	fertilizante e/ou corretivo de solo
lama abrasiva/granalha, pedaços de lâminas	recapeamento asfáltico
lama de aciaria	produção de sinter e pelotas
lama de aciaria (filtro a vácuo)	produção de sinter e pelotas
lama de aciaria LD	produção de briquetes
lama de alto-forno	produção de sinter e pelotas
lama de filtro-prensa contendo ferro e zinco	cerâmica vermelha e matéria-prima para zarcão
lama de fosfato	adubo, superfosfato triplo e fosfato simples para fertilizantes
minério de ferro titanífero	uso siderúrgico para proteção de cadinhos de alto-forno
moinha de quartzo	fabricação de cimento, tijolos
pó de calcário	construção civil, siderurgia, corretivo de solo
pó de alto-forno	produção de briquetes para utilização em aciaria e alto-forno
pó de despoejamento de aciaria	produção de sinter ou pelota
pré-cal	corretivo de solo, tratamento de efluentes
refugos de moagem de tijolos refratários	fabricação de cimento
<b>INDÚSTRIAS QUÍMICA E PETROQUÍMICA</b>	
borra de fosfato	fabricação de fertilizantes
borra de oxalato de sódio	reaproveitamento do oxalato de sódio
borra de tinta	fabricação de tintas de segunda linha
borra de tinta, solventes, resinas, pigmentos	fabricação de tintas de segunda linha
cake fluoretado	usado como fundente em siderurgia e em indústrias cerâmicas
óleo de retífica	regeneração do óleo
óleo lubrificante	regeneração do óleo
protetivo ceroso	fabricação de impermeabilizantes e recapeamento asfáltico
solventes orgânicos	fabricação de tintas de segunda linha
<b>INDÚSTRIAS DO SETOR TÊXTIL</b>	
aparas de carpete, poliamida e poliéster	fabricação de tapetes
resíduo de algodão	utilização como enchimento ou composto
retalhos e tecidos sujos de óleo e graxa	reciclagem para fabricação de estopas

Continuação da Tabela III.6

<b>INDÚSTRIAS DO SETOR DE BORRACHA E PLÁSTICO</b>	
<b>Resíduos sólidos gerados</b>	<b>Sugestões para destinação final</b>
bombonas de plástico de 50, 100 e 200 L	reciclagem de plástico
sucata de borracha	reciclagem da borracha ou co-processamento
câmaras de ar/borracha butílica	fabricação de tapetes de borracha
lonas de polipropileno	reciclagem de polipropileno
pneus	reaproveitamento, reciclagem, produção de borrachas ou co-processamento
<b>INDÚSTRIAS DO SETOR MADEIRA/MOBILIÁRIO</b>	
fino de cavaco	queima
serragem	móveis compensados
madeira	serviços de carpintaria
<b>INDÚSTRIAS DO SETOR AUTOMOBILÍSTICO</b>	
sucatas metálicas - ferrosas	carga de alto forno
sucatas metálicas - alumínio	produção de alumínio
resíduos plásticos	granulados de plásticos para produção
borras de tintas de pintura	produção de tintas de menor qualidade ou incineração
borras de solventes	combustível

### 3.3.1 - Reciclagem dos resíduos das indústrias metalúrgicas e siderúrgicas

A siderurgia é um dos segmentos mais importantes da economia brasileira, sendo responsável pela produção de metais, compreendendo processos de fabricação de produtos acabados ou semi-acabados por fundição ou conformação mecânica dentre outros. Os diversos processos e operações unitárias executadas nas siderúrgicas geram resíduos sólidos, emissões atmosféricas e líquidas, os quais requerem sistemas de tratamentos diferenciados para controlar e minimizar a agressão ao meio ambiente. Em se tratando da sustentabilidade ambiental, o setor vem promovendo programas de proteção ambiental, destacando sistemas de controle de poluição do ar, solo e das águas, arborização das usinas e programas de reflorestamento.

Dentro deste contexto, as empresas do setor metalúrgico/siderúrgico vêm desenvolvendo trabalhos interativos entre as equipes de processo e o setor de meio ambiente das mesmas, buscando soluções para ganhos metalúrgicos e econômicos e também soluções que minimizem a disposição final dos resíduos, além de possibilidades de comercialização ou reciclagem na própria empresa. O levantamento preliminar realizado em 1986 pela Comissão de Assuntos Ambientais do Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS)<sup>(15)</sup> apresentou a distribuição percentual de resíduos gerados em 38,7% escórias de alto-forno, 21,7 % escórias de aciaria, 13,7% pós e lamas, 4,7% lamas de decapagem, 4,4% carepas, 3,6% óleos e graxas e 13,2% de outros resíduos. A destinação percentual dos resíduos gerados pela indústria siderúrgica, de um total de 10,88 milhões de toneladas, cerca de 28% são destinadas a aterro, 18% são reciclados, 50% são vendidos e outros 4% ficam sem destinação.

Hoje, a questão dos resíduos industriais vem sendo tratada pelas empresas nacionais e internacionais dentro da filosofia do Sistema de Gestão Ambiental (SGA). O SGA objetiva o comprometimento e a participação de todos os integrantes de uma empresa, a fim de aumentar a produtividade, melhorar a qualidade dos produtos, através de um programa de sistematização a partir de implementação de procedimentos operacionais sob o ponto de vista ambiental, minimização dos insumos naturais (principalmente energia elétrica e água) e eliminação de desperdícios.

A tabela III.7 apresenta as estimativas dos valores percentuais (dados da CSN - Companhia Siderúrgica Nacional) de geração de resíduos relativos a cada área do empreendimento.

A seguir é apresentado o histórico dos sistemas de reaproveitamento, tratamento e formas de reciclagem para os principais tipos de resíduos sólidos gerados nas indústrias do setor metalúrgico/siderúrgico: escórias, resíduos na forma de pós, lamas e outros.

Tabela III.7

Resíduos sólidos industriais gerados por etapa do processo na CSN<sup>(16)</sup>

Processo/Operação/Atividades	Geração (t/ano)	Valores %
Sinterização	228.837	8,50
Coqueria	15.228	0,56
Alto-forno	1.323.346	49,17
Calcinação	214.261	7,96
Aciaria LD	699.113	25,98
Lingotamento contínuo	55.320	2,05
Laminador desbastador	28.920	1,07
Dessulfuração do gusa	3.240	0,12
Lingotamento a quente	61.343	2,28
Lingotamento a frio	10.467	0,38
Decapagem	6.028	0,22
Acabamento	3.269	0,12
Fundição	40.116	1,51
Oficina mecânica/elétrica	2.267	0,08
---	2.691.755	100,00

### 3.3.1.1 - Escórias de alto-forno

A escória de alto-forno é o principal resíduo industrial em termos de valores quantitativos de geração. Sua produção é função direta das especificações das matérias-primas (carvão vegetal, coque, sucatas, minério, etc.) utilizadas nos processos de fabricação de aço<sup>(17)</sup>.

O Brasil produz cerca de 7 milhões de toneladas/ano de escória de alto-forno. Deste total, aproximadamente 5 milhões são produzidas pelas grandes siderúrgicas que utilizam o carvão de coque como combustível. Cerca de 3 milhões de toneladas das escórias de composição química básica (relação  $\text{CaO/SiO}_2 > 1$ ) são utilizadas como aditivo na fabricação de cimento Portland. Outros 2 milhões são produzidas em siderúrgicas que utilizam carvão vegetal como combustível e que, por possuírem um

composição química ácida (relação  $\text{CaO/SiO}_2 < 1$ ), não são empregadas diretamente na fabricação do cimento, sendo necessário depositá-las.

A tabela III.8 apresenta a composição química típica das escórias ácidas, básicas geradas pelos altos-fornos brasileiros e cimento Portland.

**Tabela III.8**

**Composição química típica das escórias ácidas e básicas de fornos brasileiros e cimento Portland<sup>(18)</sup>**

Parâmetros	Escória básica	Escória ácida	Cimento Portland
CaO	40 - 45	24 - 39	66
SiO <sub>2</sub>	30 - 35	39 - 55	22
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11 - 18	8 - 19	5
MgO	2,5 - 9	1,5 - 9	–
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0 - 2	0,4 - 2,5	3
FeO	0 - 2	0,2 - 1,5	–
S	0,5 - 1,5	0,03 - 0,2	–
média CaO/SiO <sub>2</sub>	1,31	0,68	3

A etapa de caracterização das escórias siderúrgicas envolve aspectos químicos, físicos, mecânicos e ambientais.

A caracterização química inclui não apenas a composição química, mas também a caracterização e quantificação das diferentes fases presentes, teor de umidade e voláteis presentes, determinação de compostos químicos que possam resultar em risco ao trabalhador, consumidor e ao meio ambiente durante o manuseio e a produção. Neste caso, as escórias devem ser classificadas conforme estabelece a norma da ABNT - NBR10004/87<sup>(7,18)</sup>.

Dentre as características físicas devem ser ressaltadas a granulometria, a densidade, o volume, a quantidade e a frequência de produção, pois influenciam na viabilidade técnica de aplicação.

## Escórias Ácidas

As escórias ácidas têm sido objeto de estudos<sup>(17)</sup>, por apresentarem menor solubilidade que as básicas, hidratando-se mais lentamente, razão pela qual não têm sido empregadas e recicladas pela indústria cimenteira. Estudos realizados pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) demonstram ser possível sua utilização como adição pozolânica aos cimentos Portland. A ação pozolânica consiste na necessidade de uma fonte de cálcio para se hidratar formando C-S-H.

Dentre as formas de ativação do cimento estudadas foram testadas as teorias de:

- Ativação cálcica<sup>(17)</sup>: a cal eleva o pH e participa da reação de hidratação, baseando-se na seguinte reação estequiométrica.



- Ativação sulfato-cálcica<sup>(17)</sup>: a adição de sulfatos, como gipsita e o fosfogesso, propicia a formação de etringita ( $C_3A_3CaSO_4 \cdot 3H_2O$ ), acelerando levemente a pega.
- Ativação com silicatos e sais alcalinos terrosos<sup>(17)</sup>: a utilização de carbonato de sódio, silicatos de sódio, silicatos de potássio e mesmo hidróxido de sódio promove a produção de cimento com excepcional desempenho.

## Escórias Básicas

A reciclagem das escórias básicas de alto-forno foi mencionada no ano de 1882 e, em 1907, iniciou-se na Alemanha a produção de cimento de alto-forno (cimento a base de escória). Em 1909, a normalização alemã já permitia a adição de escória de alto-forno ao cimento Portland em conteúdo de até 30%, limite alterado para 85% em 1917. Desde então, o cimento de alto-forno poderia ser produzido com ou sem adição de clínquer<sup>(17)</sup>.

### - Cimento de Escória Sem Adição de Clínquer

Em 1862, a Alemanha produziu, pela primeira vez, cimento de escória adicionando cal hidratada à escória granulada. A partir desta época, foram realizados vários estudos para reciclagem de escória sem adição de clínquer com adição de outros agentes ativadores (silicato de sódio, soda cáustica) e, até hoje, muitas investigações ainda são desenvolvidas<sup>(17)</sup>.

Por volta de 1939, observava-se que as indústrias com fabricação de cimento Portland com escória já estavam tomando conta do mercado do cimento de escória sem clínquer. No Brasil não existem dados de unidades industriais de fabricação deste tipo de cimento de escória. Com o passar dos anos, o cimento com adição de escória sem clínquer desapareceu do mercado porque apresentava limitações técnicas e, principalmente, porque seu preço passou a ser semelhante aos dos cimentos Portland. Dentre as limitações técnicas do cimento de escória sem clínquer podemos citar<sup>(17)</sup>:

- baixa resistência mecânica, especialmente nas primeiras idades, necessitando uma cura mais prolongada e possibilitando o risco de congelamento em períodos de baixa temperatura;
- ocorrência da reação de carbonatação da cal hidratada empregada como ativador durante a armazenagem, reduzindo a resistência mecânica.

No Brasil existe uma tecnologia para produção de cimentos de escória que em 24 horas atingem resistências mecânicas superiores às dos cimentos Portland aos 28 dias. Estes estudos podem ser estendidos para as escórias ácidas. Contudo, a venda no mercado deste cimento é evitada devido ao fato de muitos consumidores não estarem preparados para utilizarem técnicas exigidas para este tipo de material (especialmente a determinação do traço adequado).

O estudo desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) apresenta a metodologia de dosagem de concreto com adição de escória no canteiro de obra e os

resultados de experimentos empregando misturas de cimentos Portland dos tipos CP-II-F-32 (composto com adição de pó de calcário) e o CPV-ARI (alta resistência inicial) a escória de alto-forno em diversas proporções e misturas<sup>(18)</sup>.

A principal conclusão dos estudos realizados é a possibilidade de adição direta de escória moída ao cimento Portland por ocasião da preparação do concreto.

O fluxograma dos experimentos é apresentado na figura 3.3.

As amostras de escória foram moídas nas finuras "Blaine" ( $400 \pm 50 \text{ m}^2/\text{kg}$ ), ( $600 \pm 60 \text{ m}^2/\text{kg}$ ), ( $800 \pm 80 \text{ m}^2/\text{kg}$ ). Utilizou-se um homogeneizador mecânico em "V" para formação das misturas. Cada mistura aglomerante foi submetida aos ensaios físicos e mecânicos, conforme as normas da ABNT - NBR11580/91 (*Água para consistência normal de pasta*), NBR11581/91 (*Determinação do tempo de pega*) e NBR7215/91 (*Consistência e resistência à compressão da argamassa normal*). Analisando os resultados, a escolha da finura foi ( $600 \pm 60 \text{ m}^2/\text{kg}$ ) e das proporções de escória/cimento de 50%/50% para o cimento CPV-ARI e 65%/35% para o CP-II-F-32. Os corpos de prova obtidos foram submetidos aos ensaios normais estabelecidos pelas normas da ABNT e os dados analisados através de métodos matemáticos (regressão linear).

Os resultados dos experimentos com aplicação dos dois tipos de cimento permitiram a incorporação da escória em teores bastante promissores, com economia de cimento de até 65% para uma maior resistência à compressão aos 28 dias, sem alteração significativa ou mesmo com alteração vantajosa em outras propriedades consideradas relevantes.

#### - Cimento Portland com Adição de Clínquer

No Brasil, a adição de escória de alto-forno na produção de Cimento Portland iniciou-se em 1952, sendo consagrada e normatizada em 1964. Hoje, são produzidos os cimentos CP-II-E (Cimento Portland com 35% de escória) e CP-III (Cimento Portland de alto-forno com 35% a 70% de escória).

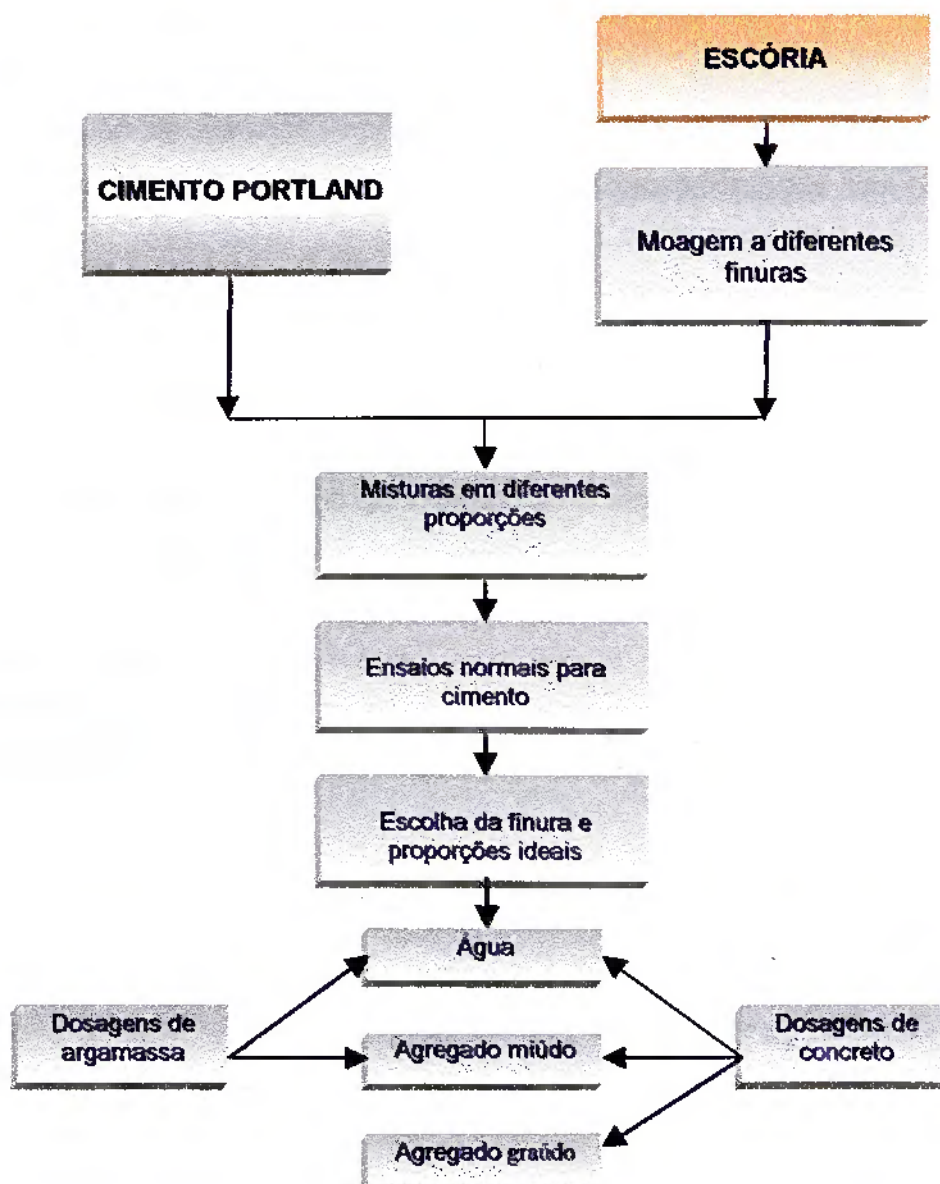


Figura 3.3

Fluxograma dos experimentos - Aplicação de escória nos canteiros de obra na mistura do concreto<sup>(18)</sup>

A figura 3.4 apresenta a comparação entre a estrutura necessária para a produção de cimentos de escória e de cimentos Portland.

Na produção de cimento Portland, a etapa de calcinação em aproximadamente 1450°C em fornos rotativos com até 100 m de comprimento faz com que a energia elétrica seja responsável por algo entre 40 e 60% dos custos de produção do cimento.

Atualmente, os processos de fabricação de cimento substituem parcialmente a adição de clínquer por escória, cujo custo de produção acarreta a redução em aproximadamente US\$20.00 por tonelada. A desvantagem apresentada pelas escórias é a necessidade das operações unitárias de preparação: moagem e secagem, significativamente mais onerosas que no caso do clínquer<sup>(17)</sup>, pois a escória dificilmente alcança preço superior a US\$15.00 por tonelada. Além desse limite financeiro, a dependência de um único consumidor constitui uma forte deficiência estratégica para as siderúrgicas.

A escória, se comercializada diretamente no mercado consumidor de cimento, torna-se o constituinte de um produto que passa a disputar mercado com o cimento Portland, cujo preço de comercialização oscila de R\$100,00 a R\$120,00. Esta modalidade de comércio é adotada nos EUA, onde o preço de venda da escória moída é de aproximadamente 80% do preço do cimento Portland comum<sup>(17)</sup>.

O concreto feito utilizando-se cimento à base de escória de alto-forno apresenta uma série de vantagens, desde a facilidade de trabalho até a constatação de maior resistência mecânica e boas propriedades anti-corrosivas<sup>(19)</sup>.

Um exemplo da aplicação de cimento Portland<sup>(20,21)</sup> à base de escória é a experiência do IPT no processo de produção de aglomerante à base de escória de alto-forno, água, cal, gipsita, areia e fibras vegetais, na fabricação de painéis reforçados com fibras vegetais (fibras de coco) para divisórias de edificações habitacionais e sua montagem no canteiro de obras. Estes painéis são conhecidos como IPI/IDRC.

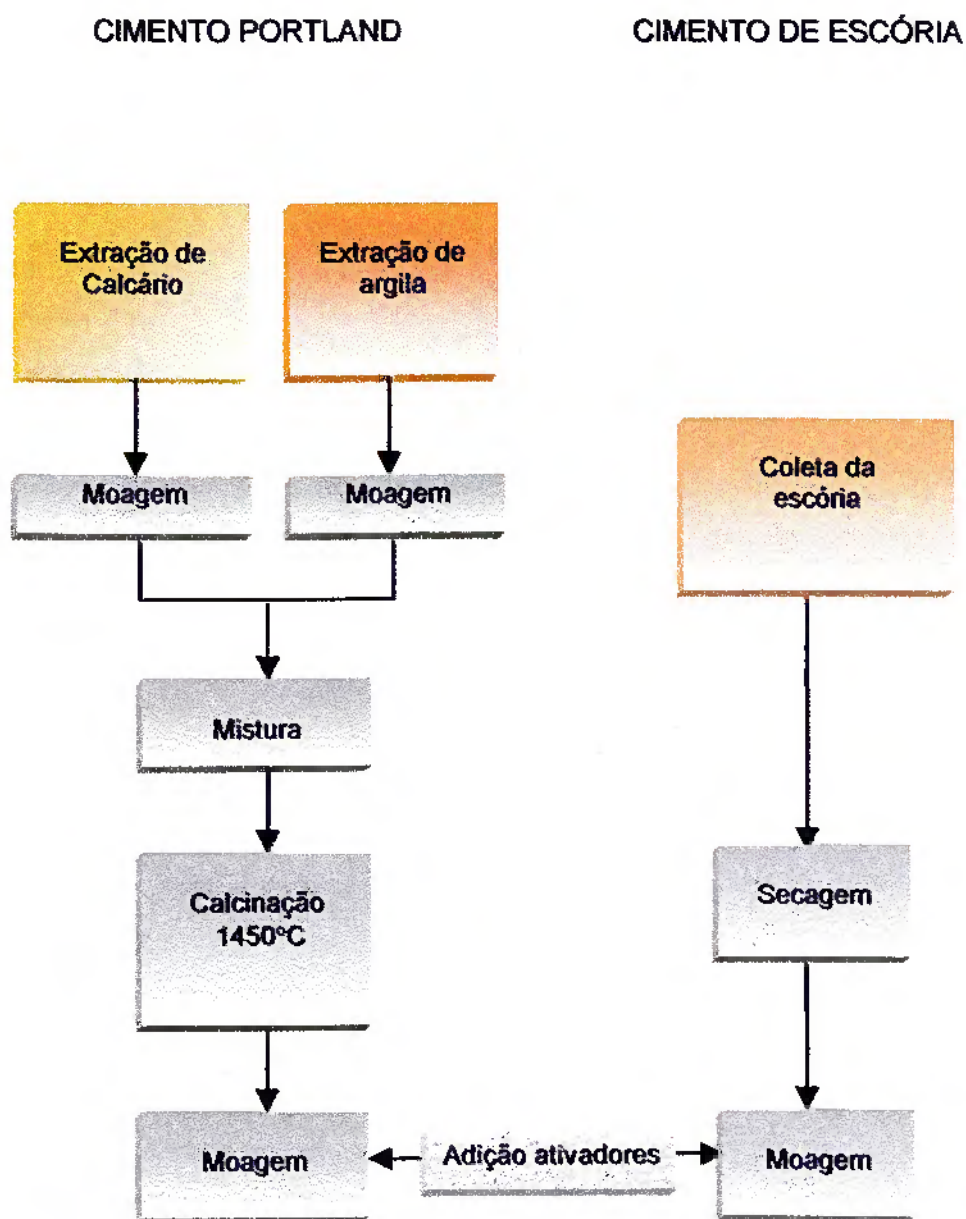


Figura 3.4

Comparação entre a mistura para produção cimentos Portland e de cimentos de escória<sup>(18)</sup>.

- *Outras alternativas para reciclagem de escórias*

Ainda no ramo da construção civil<sup>(17,19,22)</sup>, as escórias são tratadas inicialmente através de separação magnética e classificação por tamanho e posteriormente destinadas para as aplicações apresentadas na tabela III.9.

**Tabela III.9**

**Alternativas para aplicação da escória<sup>(17,19,22)</sup>**

Áreas de aplicação	Principais aplicações
Infraestrutura e Construção civil	pavimentações com escória granulada ativada com cal ou outros compostos
	blocos de alvenaria
	agregados para estabilização de solos e terrenos
	utilização como agregados para construção de bases e sub-bases, concretos asfálticos, tratamento e drenagens superficiais
	agregados para construção de diques e taludes
Outros usos	lã de rocha
	indústria de vidro
	recuperação metálica
	correção do solo e reflorestamento com eucalipto

A maioria das escórias brutas e granuladas de alto-forno podem ser empregadas como agregado para produção de argamassas e concretos. Por exemplo, em São Paulo, o preço dos agregados, em torno de R\$25,00/t, é superior ao preço de comercialização das escórias básicas, que apresentam o valor de R\$12,00/t. Contudo, para utilização como argamassas são necessárias pesquisas, tendo em vista a rugosidade dos agregados de escória e a ausência de finos<sup>(17)</sup>.

Segundo Silva et al.<sup>(17)</sup>, estudos das escórias de aciaria não são apresentados a nível internacional, porém estas vêm sendo utilizadas como base de pavimentação. Porém, sua natureza expansiva e a inexistência de critério técnico para detectar sua estabilização têm causado vários problemas de estabilidade.

A escória de aciaria<sup>(22)</sup> estudada e classificada de acordo com a norma ABNT/NBR 10004/87 apresentou-se como resíduo classe II - não inerte, devido à solubilização dos elementos alumínio e flúor levar a concentração acima dos padrões

estabelecidos na referida norma. Neste caso, foi realizada uma avaliação dos possíveis impactos ambientais causados pela aplicação da escória no encascalhamento das estradas, tais como: contaminação do solo e das águas superficiais e subterrâneas e geração de poeiras.

De acordo com as avaliações, comparando-se com os padrões nacionais e internacionais, concluiu-se que o principal impacto à saúde da população vizinha é referente à emissão de material particulado. Porém, este impacto pode ser minimizado e controlado através do molhamento das estradas seguido de sua compactação, logo após a aplicação da escória. Se comparado com o cascalho normal, esta capacidade de cimentação da escória é bastante vantajosa.

### **3.3.1.2 - Finos de materiais: carvão e finos de minério**

No final da década de 70 ocorreu o advento da crise de energia, gerada pelo aumento do preço do petróleo no mercado internacional. Os grandes consumidores de combustível foram obrigados a encontrar uma fonte alternativa de energia com qualidade e baixo custo. Nesta época, as indústrias de pelletização de minério de ferro, cimento, cerâmica e vidro substituíram parcialmente o óleo combustível por carvão vegetal ou mineral<sup>(23)</sup>.

Com o aumento no consumo de carvão, várias indústrias passaram a gerar grandes quantidades de finos, devido à sua baixa resistência, susceptibilidade à degradação em todas as operações de manuseio e estocagem, gerando pós que se dispersam com muita facilidade pelas áreas de entorno, em decorrência de sua baixa densidade.

Nas indústrias siderúrgicas os finos de carvão vegetal são originados das operações de beneficiamento, desde o empilhamento, homogeneização, britagem, peneiramento e ensilamento, havendo a necessidade de instalação de um sistema de desempoeiramento em cada unidade de operação.

Segundo a literatura<sup>(23)</sup>, a primeira iniciativa de recuperação de finos de carvão ocorreu em 1948 (Belgo Mineira), com a construção de uma unidade de sinterização,

que visava produzir sinter para alto-forno a carvão vegetal, utilizando finos de minérios de ferro, e reciclar os finos de carvão gerados nas etapas de preparação.

Pois, somente a sinterização não era suficiente para consumir todos os finos de carvão gerados. Logo, foram realizados estudos de briquetagem de finos de carvão vegetal com alimentação de um ligante, à base de alcatrão. Este ligante implicou na necessidade de uma etapa de carbonização para aumentar sua resistência, fato que inviabilizou a técnica. Hoje, a Cia. Belgo Mineira recupera, quase que totalmente, os finos de carvão no processo de sinterização ou comercialização, evitando-se assim a disposição em pátios de resíduos.

Outra experiência da Belgo Mineira, em se tratando de pós de carvão<sup>(24)</sup>, foi a implantação do sistema de qualidade total e a introdução de novas técnicas para resolução dos problemas ambientais, utilizando-se as ferramentas do PDCA (*Plan-Do-Check-Action*) e diagramas de causa-efeito. Através de soluções simples e práticas operacionais adequadas para a operação dos sistemas de despoeiramento, tornou-se possível inverter a situação de prejuízos e de poluição para gerar lucro de US\$ 3,018.00/mês.

Os pós de carvão gerados nas áreas da Açominas, juntamente com o chamado resíduo de alcatrão, são misturados e aglomerados para alimentação no alto-forno. O resíduo de alcatrão é a lama de impurezas gerada nos decantadores e centrifugas do processo primário da limpeza dos gases de coqueria. O produto aglomerado é adicionado em pequena proporção, cerca de 1,5%, nas misturas de carvão a coqueificar sem causar prejuízos na qualidade do coque<sup>(26)</sup>.

De acordo com a norma ABNT/NBR 10004, o resíduo de alcatrão é classificado como Classe I - Perigoso, devido à sua periculosidade por apresentar em sua composição hidrocarbonetos aromáticos, necessitando de técnicas especiais de disposição, associadas a inspeções quanto ao impacto ambiental (solo, águas superficiais e subterrâneas).

No início da década de 80, uma experiência semelhante foi realizada pela Usiminas<sup>(26)</sup> através da implantação do sistema com a alimentação do resíduo em um silo aquecido a vapor, seguida de um alimentador tipo sem-fim. Este sistema apresentou diversos problemas operacionais de entupimentos e até a quebra do eixo.

Então, substituiu-se por outro sistema que promovia a adição do resíduo por gravidade. Porém, nesta situação os problemas anteriores prevaleceram e a alimentação passou a ser descontínua. A partir desta alternativa, em 1987, foi adotado um sistema de alimentação por meio de um arrastador de corrente, permitindo a adição contínua e constante do resíduo. Os benefícios desta alternativa foram o baixo investimento de implantação, a economia com o reaproveitamento do carbono contido no alcatrão e os ganhos ambientais.

A tecnologia desenvolvida<sup>(27)</sup> pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) consiste na introdução de carvão recuperado do nivelamento dos pátios do Porto de Sepetiba na mistura a coqueificar. Os resultados deste estudo propiciaram uma economia de US\$5,086,000.00 no período de janeiro/1990 a abril/1991, minimizando os efeitos da crise de abastecimento sofrida pela empresa no ano de 1990.

Nas siderúrgicas, em geral, os finos gerados têm sido injetados pelas ventaneiras dos altos-fornos, minimizando as perdas e diminuindo sensivelmente a poluição ambiental. A primeira tentativa desta alternativa ocorreu em 1906, porém nesta época os resultados não foram satisfatórios, devido à falta de conhecimento dos processos de altos-fornos. Somente nos anos 80, o Japão e a França iniciaram os testes em escala de laboratório e em plantas industriais para injeção de finos de minério pelas ventaneiras. Em 1992, o *Institute of Ferrous Metallurgy* investigou a injeção de carvão/finos de minério pelas ventaneiras<sup>(28)</sup>.

As vantagens da injeção de finos de minério e carvão são:

- uso direto dos finos substituindo pelotas e sinter, acarretando em diminuição dos custos de energia no processo de aglomeração;
- aumento na produtividade;

- diminuição da razão carga/coque no forno, com o aumento da permeabilidade do gás;
- aumento no grau de combustão para alguns tipos de carvão através do fornecimento de oxigênio "sólido" para o minério de ferro;
- reciclagem dos resíduos gerados na usina, tais como: pós, lamas e carepa de laminação, evitando a formação de depósitos.

A Acesita desenvolveu a tecnologia de injeção de carvão vegetal pelas ventaneiras dos altos-fornos<sup>(29)</sup>, o que levou a um aproveitamento integral do carvão. Segundo a literatura, em 1986 a Acesita captava cerca de 50 t/dia de pós. Somente em 1986 foram aproveitados cerca de 45,3% dos finos de carvão gerados, possibilitando uma economia de 4,3 milhões de dólares.

### 3.3.1.3 - Reciclagem dos resíduos nas plantas de sinterização

Numa usina siderúrgica integrada<sup>(30)</sup> é gerada grande quantidade de resíduos industriais que, para serem descartados, apresentam inúmeros inconvenientes, tais como:

- necessidade de grande área para disposição;
- elevado custo de transporte e preparação da área de descarte (média de US\$30 a US\$40 por tonelada);
- perda de materiais;
- contaminação do meio ambiente.

Neste aspecto, os resíduos podem ser aproveitados no processo de sinterização, seja através de uma simples mistura e/ou pelos processos de aglomeração, seja por pelotização ou briquetagem.

No caso da CSN foram desenvolvidos estudos para reaproveitar os resíduos através da mistura a sinterizar, em duas etapas<sup>(30)</sup>:

- primeira etapa: foram utilizados os resíduos que podiam ser dosados diretamente sobre o leito de sinterização, conforme mostra a tabela III.10;

- segunda etapa: passou-se a reciclar as lamas e os pós que eram depositados fora da usina em aterros, a um custo elevado, e que tinham como principais características a dificuldade de manuseio devido ao elevado teor de umidade, conforme a tabela III.10.

Tabela III.10

Resíduos recicláveis na CSN - Etapas do estudo<sup>(30)</sup>

Primeira etapa		Segunda etapa		
Material	Geração t/mês	Material	Geração t/mês	Mistura %
cal	4.200	moinha	600	1,0
carepa	5.800	resíduo industrial fino	20.000	35,4
pó de apagamento	800	escória de alto-forno granulada	93.000	-
calcário calcinação	14.300	pó do coletor	4.500	8,2
dolomito calcinação	1.800	lamas dos altos-fornos	3.400	6,2
resíduo industrial fino	13.800	pó da sala de corridas	500	0,9
sucata C (escória de aciaria beneficiada)	1.800	lama da ETE	850	1,5
<b>TOTAL</b>	<b>42.500</b>	lama de cal	180	0,3
		sucatas C do LD	1.800	3,3
		pó da fundição	10	0,02
		pó da dessulfuração do gusa	70	-
		lama do separador primário do LD	2.500	4,5
		lama do filtro a vácuo do LD	10.000	18,2
		pó do sistema secundário do forno LD	600	1,0
		pó dos galpões dos altos-fornos	250	0,4
		carepas diversas	8.000	14,5
		finos de ura	600	1,0
		-	<b>146.860 t/mês</b>	<b>96,42</b>

Na segunda etapa foram desenvolvidos ensaios em escala piloto e industrial. Nos ensaios piloto, após a realização da mistura, retirou-se uma amostra para caracterização física e química. Os resultados obtidos são apresentados na tabela III.11.

**Tabela III.11**

**Características físico-químicas da mistura de resíduos<sup>(30)</sup>**

Análise química (%)		Análise granulométrica	
SiO <sub>2</sub>	4,617	9,52 mm	2,66%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,915	6,35 mm	4,86%
MgO	2,702	3,17 mm	18,58%
CaO	8,746	2,00 mm	10,18%
Fe (t)	49,898	1,0 mm	11,80%
Fe (metálico)	2,145	0,5 mm	12,33%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	42,282	0,106 mm	22,09%
FeO	23,459	-0,016 mm	17,15%
S	0,158		
P	0,072		
C livre	8,113		
K <sub>2</sub> O	0,065		
Na <sub>2</sub> O	0,04		
Pb	0,01		
Zn	0,565		
Cr	0,012		
Mn	0,601		
umidade	10,05		

Em seguida, foram feitas pilhas da mistura a fim de se determinar a umidade após um dia, uma semana e um mês. Os resultados indicaram que, para uma umidade inicial de 12%, os percentuais de perda foram de 22%, 47% e 78%, respectivamente, para um dia, uma semana e um mês de empilhamento.

Os ensaios em escala industrial foram realizados em duas fases para receber todos os resíduos na região norte do pátio de minérios da empresa. Em seguida, através de uma pá mecânica realizou-se a mistura da lama com material seco, adicionando-se finos de sinter como agente acelerador da secagem. A primeira fase consistiu na adição de 3% da mistura total e teve uma duração de 9 dias. Já a segunda fase teve a duração de 19 dias e passou-se a adicionar 5% da mistura total, consumindo-se, assim, cerca de 7.006 t de resíduos.

Os ensaios industriais foram realizados com as medições da emissão de material particulado, a fim de se certificar sobre o impacto ambiental. Os resultados são mostrados na tabela III.12, certificando que as emissões encontram-se dentro dos padrões legais de emissão.

**Tabela III.12**

**Resultados do monitoramento das emissões atmosféricas<sup>(30)</sup>**

Parâmetros	3% da mistura	5% da mistura
Material particulado (kg/h)	113	124
SO <sub>2</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> )	305	363

Na Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST) foram realizados testes em escalas piloto e industrial com utilização de rejeitos siderúrgicos<sup>(31)</sup>. Realizaram-se ao todo 8 (oito) diferentes testes, cujos resultados são apresentados na tabela III.13.

Os resultados dos testes industriais mostraram-se bastante promissores com o reaproveitamento do pó de alto-forno, pó de coqueria, carepa, cal fina e calcário fino britado, havendo o aumento no rendimento e qualidade metalúrgica, acarretando diminuição na compra de materiais, tais como: *Standard Sinter Feed* e calcário.

Outra referência<sup>(32)</sup> da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) apresenta o processo de adição direta do pó do coletor na máquina de sinter, em substituição parcial à moinha de coque, tendo em vista o elevado custo de produção de gusa (cerca de US\$159.00/t de gusa). A empresa Companhia Siderúrgica Tubarão (CST) apresentava o custo de produção de cerca de US\$127.81/t de gusa.

A CSN analisou os fatores que afetam o seu alto custo do gusa na metalurgia de redução e identificou a causa fundamental do problema, através do diagrama de Pareto, que consistiu na necessidade de se utilizar o pó de coletor no processo, substituindo a moinha na mistura total.

**Tabela III.13**

**Resumo dos testes-piloto realizados na CST - Aproveitamento de resíduos na planta de sinterização<sup>(31)</sup>**

Aglomerantes	Combustíveis	Adição de resíduos
<p><u>Cal virgem:</u> devido o seu alto poder de aglomeração, este material propiciou a melhora das propriedades das micro-pelotas e aumentou a produtividade. O aumento de 1% na adição da cal promoveu a elevação da produtividade em níveis de 20%.</p>	<p><u>Pó de alto-forno:</u> o pó de alto-forno possibilita a economia de coque e a manutenção da qualidade e rendimento do sinter, não alterando os níveis de metais estipulados pelo alto-forno.</p>	<p><u>Carepa:</u> o uso da carepa melhora os parâmetros operacionais e a qualidade do sinter, porém piora sua qualidade metalúrgica.</p>
<p><u>Pré cal calcítica:</u> consiste num rejeito gerado nos sistema de despoejamento da cal virgem. Os resultados mostraram que o uso da pré-cal acarretou o aumento da produtividade, sendo superior em cerca de 40% em relação à cal virgem.</p>	<p><u>Pó de CDQ:</u> os testes mostraram a viabilidade de se utilizar até 15% do pó de coqueria na mistura a sinterizar, sem afetar as condições metalúrgicas do processo.</p>	<p><u>Escória de dessulfuração:</u> mostrou-se tecnicamente viável atuando positivamente no rendimento da produção, porém causou redução na qualidade metalúrgica e aumento no teor de P (fósforo) na escória, que pode comprometer o balanço de P no alto-forno.</p>
<p><u>Cal dolomítica:</u> os resultados não se mostraram satisfatórios, mesmo com adequação granulométrica.</p>		
<p><u>Cal hidratada:</u> os resultados mostraram superioridade da cal virgem em 7%.</p>		

Uma das ações foi planejar, agir e verificar os resultados obtidos com a adição de pó de coletor. Os resultados comprovaram a vantagem econômica, sem prejudicar a qualidade do sinter, até a taxa de 4% na mistura total, passando o pó de coletor a ter um tratamento de combustível sólido. A economia anual foi de Cr\$285.559.000,00

(preço padrão de 1991 - cotação média anual US\$1.0≡Cr\$250,00, equivalente a US\$1,142,236.00)<sup>(32)</sup>.

Outros estudos realizados na CSN para o reaproveitamento de resíduos consistiram no trabalho da Dissertação de Mestrado intitulado como "Emprego de Rejeitos Siderúrgicos Pelotizados na Sinterização de Minério de Ferro"<sup>(33)</sup>. A mistura de rejeitos de pós de coletor e lamas gerados no alto-forno 3 da CSN, cujas gerações são respectivamente de 6 kg/t e 4 kg/t para uma produção diária de 12.000 t de gusa (Dados de 1982). Além disso, a mistura de rejeitos recebeu os pós e lamas gerados no processo de aciaria LD e do forno elétrico e os pós precipitados dos exaustores principais das máquinas de sinterização.

Baseando-se na geração dos resíduos, a mistura de pós da sinterização, do alto-forno, da aciaria, do forno elétrico, lama de alto-forno, lama grossa e fina do sistema de OG, apresentou-se a composição, conforme mostra a tabela III.14.

O resultado da composição química da mistura foi comparado com dados de literatura de estudos já realizados no exterior, revelando algumas diferenças em termos de teores de Zn, Pb, C e Fe e distribuição granulométrica, peculiares em termos da reciclagem dos materiais.

A partir do estudo de viabilidade econômica do processo, decidiu-se pela análise do seu emprego da mistura na sinterização 4 da CSN, na proporção de 4% da carga utilizada, buscando a economia em matérias-primas, admitindo-se que o custo de processamento desses rejeitos através da produção de pelota varie de US\$4.00 a 10.00 a tonelada.

Os estudos envolveram a produção de pelotas e mini-pelotas para serem alimentadas na máquina de sinterização, assim como a simples homogeneização num misturador seguida de alimentação na sinterização. Os resultados mostraram que a mistura de resíduos na sinterização não alterou as características de granulometria e de condicionamento. Além disso, a aplicação da mistura de resíduos acarretou uma diminuição de 15% no consumo de moinha de coque<sup>(33)</sup>.

Tabela III.14

Composição química da mistura de rejeitos siderúrgicos<sup>(33)</sup>

Constituintes	Teores (em % )
Fe total	45
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15
FeO	10
SiO <sub>2</sub>	5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,5
CaO	6
MgO	1
Mn	0,5
P	0,06
S	0,2
C	20
Cr	-
TiO <sub>2</sub>	-
Cu	-
Zn	0,15
Pb	0,15
Sn	-
Na <sub>2</sub> O	0,1
K <sub>2</sub> O	0,2
Perda por ignição	-

A Siderúrgica Barra Mansa S/A desenvolveu um estudo que possibilitou o reaproveitamento ao máximo de pós residuais gerados, através do processo de pelotização em disco rotativo, e a recuperação do zinco e chumbo presentes. Os ensaios foram realizados para os seguintes resíduos: pó de despoeiramento do forno elétrico (4.500 t/ano), pó do despoeiramento da sinterização (1.200 t/ano), lama de despoeiramento do convertedor LD (5.000 t/ano) e pó do despoeiramento do manuseio de carvão (450 t/ano)<sup>(34)</sup>.

Os testes de aglomeração foram realizados para diferentes misturas, respeitando as proporções de geração e adicionando ou não agentes aglomerantes (cimento e carvão vegetal). O objetivo foi a produção de pelotas verdes de boa qualidade,

porém foram desenvolvidos testes exploratórios para a produção de pelotas calcinadas. Porém, estudos práticos indicam que a calcinação de materiais em pequena escala é economicamente inviável.

A análise dos resultados indicou a potencialidade para reaproveitamento dos pós como pelotas para serem alimentadas nos altos-fornos da empresa e a recuperação dos metais: ferro, zinco e chumbo.

Outra estudo desenvolvido foi a recuperação do material particulado (resíduo de aciaria elétrica) coletado pelo sistema de limpeza de gases do forno elétrico a arco da Vilares Indústria de Base S/A (VIBASA). O resíduo foi caracterizado através de várias técnicas: análise por espectroscopia de absorção atômica, análise granulométrica, superfície específica (BET), difração de raios-x e análise morfológica e por dispersão de energia (EDS), utilizando-se microsonda acoplada ao microscópio eletrônico de varredura<sup>(35)</sup>.

Os resultados obtidos da caracterização de um resíduo de aciaria elétrica são apresentados na tabela III.15.

Nos ensaios de produção de pelotas auto-redutoras foram empregados finos de carvão mineral (-65#) com 70,5% de carbono fixo e 14% de voláteis. Como aglomerante utilizou-se o cimento Portland tipo CP-ARI-plus.

Após a mistura das matérias-primas, a formação das pelotas foi feita num disco acoplado e uma betoneira, tendo sido utilizada água como líquido de ação intergranular. As pelotas foram produzidas com 7 e 14 mm de diâmetro sem aglomerante e com 5% de cimento Portland.

As pelotas foram curadas ao ar, sendo em seguida submetidas aos ensaios de análise termogravimétrica, medindo-se a variação volumétrica e a resistência à compressão após o aquecimento das pelotas, sempre utilizando-se o fluxo de argônio de 1 litro/minuto.

Tabela III.15

Resultados da caracterização de um resíduo da aciaria elétrica<sup>(35)</sup>

Componentes	(%)	Componentes	(%)
Fe (t)	49,10	ZnO	4,41
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	70,20	PbO	0,55
SiO <sub>2</sub>	3,80	CdO	0,007
CaO	8,40	S	0,22
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,84	C	2,90
MgO	1,18	K <sub>2</sub> O	1,30
MnO	3,17	Na <sub>2</sub> O	1,70
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,59	outros	0,73
<b>Morfologia</b>	A morfologia é predominantemente esférica devido aos mecanismos de formação através de vaporização e ejeção de partículas de metal e de escória.		
<b>Análise por EDS</b>	Tratam-se de partículas muito complexas contendo ferro e oxigênio como elementos predominantes.		
<b>Distribuição granulométrica</b>	Distribuição completamente irregular.		
<b>Superfície específica</b>	O método BET mostrou o valor de 3,62 cm <sup>2</sup> /g.		
<b>Difração de raios-x</b>	Observou-se a presença de Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e SiO <sub>2</sub> .		

As pelotas foram submetidas a diferentes ciclos térmicos. A tabela III.16 apresenta o procedimento operacional para um determinado ciclo.

Tabela III.16

Ciclos térmicos empregados na produção de pelotas para determinados lotes de amostras<sup>(35)</sup>

Ciclos Térmicos						Lotes de amostras
T (°C)	520	650	1050	1100	1150	5 e 13
tempo de permanência (min)	10,00	12,10	18,49	21,49	25,30	—
T (°C)	500	700	1050	1100	1150	16 e 17
tempo de permanência (min)	10,00	13,30	19,00	21,00	25,00	—

Após percorrer as várias temperaturas nos períodos especificados, mediu-se a variação volumétrica ocorrida na pelota e a resistência à compressão após o aquecimento até um determinado ponto do ciclo, através das seguintes expressões:

- Variação volumétrica:  $V_f / V_i = (D_f / D_i)^2$

$V_f / V_i$ : relação da variação do volume aparente;

$D_f$  e  $D_i$ : diâmetro final e inicial da pelota.

- Resistência à compressão :  $R_n = (\theta_f / \theta_i)^2 \cdot R_c$

$R_n$ : resistência à compressão normalizada (Newton/pelota) para pelotas de 18 mm de diâmetro;

$R_c$ : resistência à compressão da pelota de diâmetro normal;

$\theta_f$ : diâmetro real da pelota (mm);

$\theta_i$ : diâmetro padrão (18 mm).

A análise dos resultados mostrou que as pelotas com diâmetro de 7 mm e 5% de cimento Portland foram as únicas que não apresentaram inchamento catastrófico, possuindo boa resistência à compressão após o aquecimento.

Estudos mais recentes de produção de pelotas auto-redutoras foram desenvolvidos para os seguintes materiais<sup>(36)</sup>, utilizando-se o cimento Portland como aglomerante:

- pelotas auto-redutoras de finos de minério de ferro e carvão vegetal;
- pelotas auto-redutoras de resíduo de aciaria elétrica a carvão mineral.

As temperaturas de redução foram na faixa de 950-1150°C. As principais conclusões dos estudos são que o inchamento catastrófico de pelotas auto-redutoras pareceu estar associado às condições de redução onde a reação de *Boudouard* exerceu o controle sobre a etapa química e, nestas condições, foram formados filamentos de ferro durante a etapa de "FeO - Fe". Além deste fato, o inchamento pode ser causado pela etapa de condução de calor através da pelota auto-redutora se, e somente se, a reação de *Boudouard* for a única fonte de carbono.

As pelotas auto-redutoras a carvão vegetal com diâmetro de 9,1 mm à temperatura de 1150°C não apresentaram inchamento catastrófico, pois nesta temperatura a morfologia do ferro foi mista, isto é, apresentou conglomerados de filamentos cônicos adjacentes às microrregiões de ferro poroso<sup>(38)</sup>.

Outros fatores de grande interesse são o uso do aglomerante (5% de cimento Portland), a diminuição do diâmetro da pelota (de 14 mm para 7 mm) e a necessidade de produção de uma pelota apta aos processos de auto-redução. Dessa maneira, comprovou-se experimentalmente a possibilidade de emprego potencial de pelotas auto-redutoras para o reaproveitamento de pós gerados pela aciaria elétrica.

#### **3.3.1.4 - Reaproveitamento de lamas e pós**

Os resíduos de lama podem ser gerados através dos sistemas de controle de poluição atmosférica (precipitadores eletrostáticos a seco ou a úmido, lavadores de gás) e dos tratamentos dos efluentes líquidos (tratamentos de superfície, lama de aciaria, de sinterização, de alto-forno, etc.).

Segundo a literatura<sup>(37,38)</sup> os resíduos de lamas e pós gerados pelas indústrias do setor metalúrgico/siderúrgico do Japão apresentam os valores quantitativos mostrados na tabela III.17.

Deste total de geração<sup>(37)</sup>, cerca de 40% são reaproveitados nas plantas de sinterização, 12% nos altos-fornos, 25% em fábricas de cimento, 12% nas plantas de briquetagem e pelletização e 8% são depositados. Um maior detalhamento dos sistemas de destinação final dos resíduos se segue:

- resíduos do pátio de materiais: são reciclados nas plantas de sinterização e pelletização após a etapa de mistura com outros pós e, se necessário, com ajuste da umidade. Os finos de minério de ferro são comercializados para as fábricas de cimento;
- fundição a coque: devido ao fato de ser uma fonte de carbono, este resíduo é reutilizado completamente nas usinas siderúrgicas;

Tabela III.17

Geração de resíduos de lamas e pós nos processos de fabricação de aço no Japão (Dados de 1984)<sup>(37)</sup>

Geração de Lamas		
Fontes	t/ano	%
Pátio de materiais	25.200	2,8
Plantas de sinterização	101.000	11,1
Fundição	113.200	12,4
Altos-fornos	502.800	55,2
Borra de alcatrão	78.800	8,7
Lodo ativado	5.700	0,6
Outros	85.900	9,2
Subtotal	910.600	100,0
Geração de Pós		
Pátio de materiais	377.600	16,6
Plantas de sinterização	850.000	37,4
Fundição	177.700	7,8
Altos-fornos	868.700	38,2
Subtotal	2.274.000	100,0
<b>TOTAL</b>	<b>3.184.600</b>	

- borra de alcatrão: pode ser retornada para a fundição a coque, misturada com carvão ou queimada em incineradores, juntamente com os resíduos de óleos;
- lodo ativado: o lodo ativado contendo licor de amônia gerado pelos sistemas de tratamento de água é, geralmente, retornado para a fundição a coque ou calcinado após desidratação;
- lamas da sinterização: os pós e lamas gerados pelos ciclones, lavadores de gás e precipitadores eletrostáticos (seco ou úmido), contendo alto teor de ferro e cálcio, são reaproveitados na usina siderúrgica. Quando os resíduos apresentam considerável quantidade de álcalis podem causar corrosão ou ataque aos

refratários dos altos-fornos. Neste caso, estes são depositados ou tratados através do processo de pelletização;

- lamas de alto-forno: os pós são reaproveitados nas plantas de sinterização ou pelletização. Os resíduos de lamas apresentam certas restrições de uso, devido ao elevado conteúdo de álcalis e óxidos de zinco e chumbo. A reciclagem destes materiais acarreta problemas no processo, além de causar outros impactos ambientais. Usualmente, a carga máxima de óxidos de zinco e chumbo no alto-forno é de 0,1 a 0,2 kg/t de gusa.

As lamas de alto-forno não podem ser simplesmente misturadas com os materiais de insumos nas plantas de sinterização e pelletização. Estes resíduos, ou mesmo outros pós de partículas muito finas, podem aumentar a insuficiência da permeabilidade do gás e diminuir a eficiência do processo metalúrgico. As tecnologias de pré-tratamento existentes no Japão são mostradas na tabela III.18.

#### - *Processo de mini-pelletização e briquetagem*<sup>(37)</sup>

Este processo é constituído pelas etapas de mistura e formação de pelotas de pós e lamas que, posteriormente, são alimentadas na sinterização. Os resíduos com elevado teor de zinco são pré-tratados para a remoção do zinco, secados e pelletizados. As características físicas das mini-pelotas são: diâmetro médio de 2 mm a 6 mm e resistência de 2 kg/mini-pelota sendo adequadas para alimentar o processo de sinterização.

#### - *Processo de pelotas oxidadas*<sup>(37)</sup>

As pelotas oxidadas podem ser alimentadas diretamente nos altos-fornos. O processo de produção consiste basicamente na secagem em secador rotativo, blendagem, granulação através de moinhos, formação de pelotas através de disco pelletizador, seguindo-se as etapas de peneiramento, pré-aquecimento sobre grelhas e calcinação em fornos rotativos.

Tabela III.18

Características das técnicas do pré-tratamento dos resíduos<sup>(37)</sup>

Método do tratamento	Fluxo do processo	Características
Processo de mini-pelotização	Desaguamento ↓ Misturação ↓ Pelotização ↓ Máquina de sinterização	- equipamento de fácil construção
Processo de pelotas oxidadas	Desaguamento ↓ Secagem ↓ Misturação ↓ Pelotização ↓ Calcinação ↓ Alto-forno	- aglomeração de pós finos
Processo de pelotas redutoras	Desaguamento ↓ Secagem ↓ Misturação ↓ Pelotização ↓ Calcinação redutora ↓ Alto-forno	- remove o zinco com eficiência; - reduz a taxa de combustível para o alto-forno

- Processo de pelotas redutoras<sup>(37)</sup>

Este processo, além de pelotizar os materiais, tem o objetivo de recuperar os óxidos de zinco e chumbo contidos nos resíduos. O processo consiste nas operações de desaguamento, filtragem, e secagem em secador rotativo. Após a secagem o material é alimentado em um moinho de bolas, onde recebe a adição de um aglomerante. A descarga do moinho alimenta os discos pelotizadores. As pelotas alimentam o pré-aquecedor e seguem para o forno rotativo. Os finos de carvão são utilizados como redutores. Os gases gerados no pré-aquecedor e no forno rotativo são capturados e o zinco é recuperado por volatilização.

No Japão existem duas empresas (*Kushima Works e Wakayama Works of Sumitomo Metal Industries, dados de 1984*) que operam este processo para recuperar e comercializar o óxido de zinco. A economia do processo depende dos custos de energia, consumo de combustível e de redutor, tornando-se viável em grande escala de produção.

Os demais países, ressaltando Alemanha e Brasil, vêm desenvolvendo tecnologias para recuperação dos metais pesados, principalmente zinco e chumbo contidos nos resíduos ferrosos de alto-forno, sinterização, pós e lamas de aciaria elétrica.

Na década de 70, a Alemanha realizou estudos para recuperação de zinco e chumbo no forno Waelz<sup>(38)</sup>. Os resíduos pelotizados eram alimentados no forno, onde 95-99% do zinco era volatilizado. A volatilização do chumbo oscilava, porém o produto final apresentava um conteúdo abaixo de 0,1%. Os resultados gerais dos testes para recuperação de zinco e chumbo foi da ordem de 50%. O material ferroso era briquetado e alimentado no alto-forno.

Esta experiência de recuperação de zinco vem sendo estudada no Brasil, através da reativação do Forno Waelz pertencente à Cia. Mineira de Metais - Vazante (MG). Estes processos mostram-se pouco eficazes devido ao elevado consumo e custo de energia.

A principal tendência existente no mercado consiste no gerenciamento de resíduos sólidos na reutilização e eliminação de resíduos incluindo a separação de teores de Zn e Pb dos pós, lamas e sucatas gerados pela metalurgia, o tratamento e reutilização de óleo e teores de óleos em ferro como carepas e os resíduos da indústria de ferro e aço (plantas de sinterização, altos-fornos, convertedores LD e fornos elétricos).

O gerenciamento de resíduos tem o objetivo de evitar eventuais problemas técnicos no processo devido à presença de metais pesados (Zn e Pb) e, assim, realizar a remoção seletiva desses componentes a partir de fluxo de material reciclado permitindo a aplicação de, por exemplo, uma unidade de separação e análise de um

analisador laser on-line, aumentando o valor de frações recicladas e gerando um produto valioso para processos de recuperação posteriores (por exemplo recuperação do zinco) ou vendas imediatas.

No caso em questão, o processo de recuperação de cobre e zinco de materiais consiste num ciclone de fusão ascendente refrigerado de construção tubular, onde o calor é recuperado na forma de sistema de vapor saturado. O material é alimentado pneumicamente e soprado tangencialmente dentro do ciclone, contendo o combustível e o oxigênio requeridos para a combustão. A temperatura na parte superior do ciclone é da ordem de 1800°C, ocorrendo a fusão da ganga e a gaseificação dos metais presentes (Zn, Pb e Cu). Os vapores metálicos são refrigerados e recuperados numa unidade de filtração e a escória fundida é enviada para o sistema de recuperação.

Independentemente do sistema de controle de poluição, seja para o ar ou água, os efluentes líquidos necessitam de tratamento antes de serem lançados no ambiente, em atendimento à legislação ambiental vigente.

Os efluentes industriais contendo elevadas concentrações de elementos tóxicos (óleos, graxas, metais pesados: Pb, Zn, Cr, Cu, compostos ácidos e alcalinos, cianetos, etc.) são enviados para o sistema convencional de tratamento. O sistema consiste nas etapas de neutralização/oxidação, floculação e filtração. Na maioria dos casos, este processo é pouco eficaz, necessitando de etapas secundárias para polimento dos efluentes e gerando resíduos sólidos com alto grau de periculosidade ao meio ambiente.

A experiência da ACESITA<sup>(39)</sup> consistiu no desenvolvimento de metodologias para tratar os efluentes líquidos gerados na decapagem química e no lavador de gases, a fim de adequá-los aos padrões de lançamento.

O processo de decapagem ácida utiliza ácido sulfúrico diluído (18% p/v), para remoção dos óxidos de ferro formados no aço. Com a reação química processada, os banhos tornam-se ricos em sulfato ferroso, reduzindo a concentração da solução de

ácido sulfúrico. Este fato implica na necessidade do descarte do banho na vazão média de 10 m<sup>3</sup>/h, contendo cerca de 1,65 t/mês de sólidos.

Os processos de lavagem dos gases dos altos-fornos 1 e 2 e do forno de redução são realizados sob operações diferenciadas, contudo, os efluentes gerados são misturados em uma caixa que alimenta o espessador. O *overflow* do espessador

retorna aos lavadores de gás dos altos-fornos 1 e 2 fechando o circuito. O retorno para o lavador do forno de redução mostrou-se inviável tecnicamente, devido à formação de espumas na coluna de aspersão com risco de explosão. O *underflow* é bombeado para o sistema de filtração. Os efluentes retornam para o espessador ou são lançados na rede de efluentes e a fração sólida (lama) é coletada e depositada.

A etapa de caracterização demonstrou excesso de alcalinidade nos efluentes do forno de redução e elevada acidez nos efluentes da decapagem e altos-fornos 1 e 2. Após inúmeros testes com adição de coagulantes, floculantes e polieletrólitos, a solução encontrada pela ACESITA foi o aproveitamento do rejeito ácido como coagulante para os efluentes dos fornos 1 e 2 e os efluentes alcalinos do forno de redução como reagente de coagulação de todo o sistema. Esse tratamento propiciou uma economia de US\$ 4,500.00/mês, além do ganho ambiental<sup>(39)</sup>.

Segundo a literatura<sup>(40)</sup>, as principais alternativas de recuperação das lamas de aciaria e siderúrgicas são mostradas na figura 3.5.

Na Cia. Siderúrgica Tubarão - CST (dados 1990)<sup>(40)</sup>, os resíduos de lama da aciaria são formados pelos efluentes dos sistemas de despoeiramento e do tratamento de água de limpeza do gás dos convertedores LD. Estes resíduos foram estudados com o objetivo de se identificar rotas tecnológicas para o enriquecimento do teor de ferro e a reciclagem no convertedor, substituindo parte da carga de matérias-primas e sucatas.

Os estudos de concentração desenvolvidos para reciclagem dos resíduos foram:

- separação magnética a úmido;
- espiral de *Humphreys*;
- flotação reversa;
- mesa oscilatória (01 estágio) e combinação de vários estágios;
- testes de concentração otimizados: moagem + elutriação.

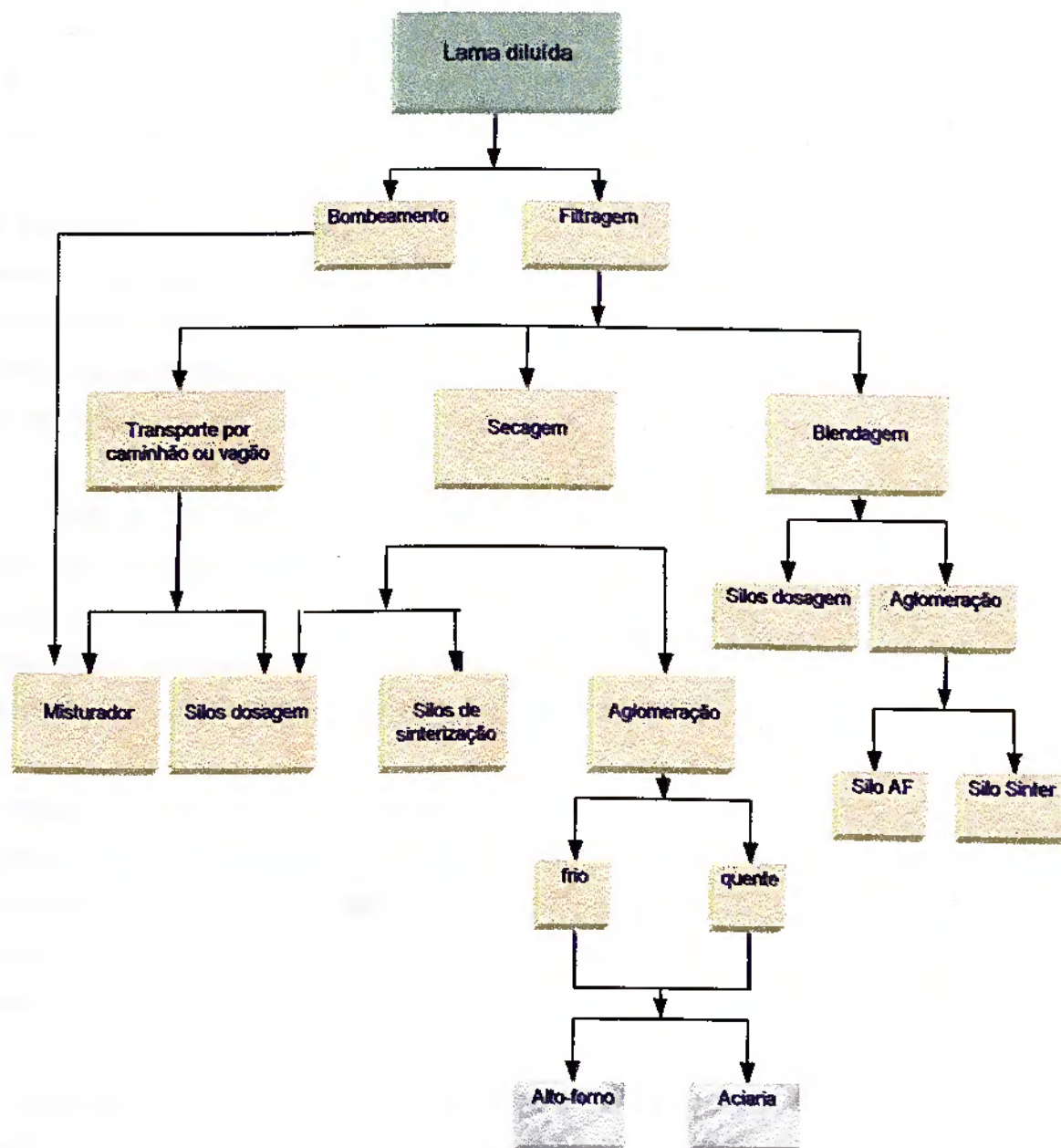


Figura 3.5

Fluxograma das principais alternativas de recuperação de resíduos de lamas<sup>(40)</sup>

Os resultados obtidos, comparativamente, entre todos os ensaios/testes da concentração da lama de aciaria, indicaram que o processo de moagem, seguida de separação e classificação por elutriação, produziu teores de ferro superiores a 94% e recuperação em massa de 75%.

Estudos mais recentes desenvolvidos pela CST<sup>(41)</sup> mostraram que a aplicação da moagem, separação e classificação em escala industrial não era mais viável. Neste caso, nova alternativa para o beneficiamento da lama (*underflow e overflow*) de aciaria foi identificada e testada em escalas de laboratório e semi-industrial.

A alternativa consiste no processo de concentração por separação magnética. Em escala laboratorial os resultados mostraram-se bastante satisfatórios, principalmente no que diz respeito aos índices de recuperação e rendimento, a partir dos baixos teores de ferro metálico na alimentação, cujos valores médios são respectivamente de 86,28% e 24,68% (valores para uma amostra).

Em 1995, a CST implantou uma planta semi-industrial de separação magnética, projetada para três circuitos diferentes (lama grossa, lama fina e alimentação) consistindo basicamente de uma caixa de bombeamento de polpa, dois separadores magnéticos de rolos de 30x18" com ímãs permanentes, uma peneira com abertura tipo Rima e caçambas para recolhimento de concentrado e rejeito.

O circuito 1 (setembro 1996) apresentou um concentrado com teor de ferro metálico superior a 90%. A capacidade nominal de produção para o circuito 1 é 1350 t/mês de concentrado. Até janeiro de 1997 foram obtidos um total de 4.340 t de concentrado, sendo a maior produção atingida em janeiro de 1,272 t. Atualmente, esta planta vem operando através do circuito 2 (lama fina).

O concentrado obtido está sendo utilizado sob forma de briquete e, em função do seu grau de pureza, vem substituindo a sucata externa na carga do convertedor LD e/ou a sucata de refrigeração na panela de aço.

A Alcan - Alumínio do Brasil S.A.<sup>(42)</sup> tem reciclado o aluocoque em indústrias cerâmicas, implicando em ganhos ambientais, não só para a Alcan, como a redução do uso de lenha na indústria cerâmica devido ao poder energético do aluocoque.

A lama vermelha, resíduo da produção de alumina a partir da bauxita, é conhecida por ser altamente poluidora, devido à alcalinidade (pH entre 13 e 14), e por conter substâncias tóxicas. Segundo a literatura<sup>(41)</sup>, a geração mundial desta lama é de 30 milhões de toneladas/ano.

A tabela III.19 apresenta uma listagem das principais aplicações da lama vermelha.

**Tabela III.19**

**Principais usos da lama vermelha gerada no Processo Bayer<sup>(43)</sup>**

Ramo da utilização	Características do processo	Desenvolvido por
Metalurgia do ferro	Despejo no mar	<i>British Aluminium Co. Ltd.</i>
	Sinterização para uso no Processo Renn	<i>Martinserk GmbH</i>
	Fundição para obtenção de ferro de baixa pureza	<i>Gebr. Giuliani</i>
	Recuperação do ferro com produção simultânea de escória de aluminato de cálcio	<i>Research Institute VAMI Leningrad</i>
Materiais de construção	Matéria-prima de tijolos de alta resistência ao impacto	<i>Gebr. Giuliani</i>
	Aditivo para fabricação de cimento e aditivo para concreto	<i>VAW, Lippewerk</i>
Recuperação de metais com produção concomitante de cimento	Recuperação de ferro com produção concomitante de nefelina, sinterização da escória, possibilitando a recuperação de NaOH e Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , utilização do resíduo sólido na fabricação de cimento	<i>Hungarian Aluminium Company</i>

As lamas vermelhas secas apresentam a composição química mostrada na tabela III.20 para três diferentes origens de lamas. Os resultados mostram as diferenciações para os teores de óxido de ferro e alumina devido às variações nas características dos bauxitos.

**Tabela III.20**

**Composição química apresentada para três lamas vermelhas de diferentes origens<sup>(43)</sup>**

Óxidos (%p/p)	Lama 1	Lama 2	Lama 3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	51,21	40,48	24,60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,34	15,17	23,63
CaO	4,46	2,32	4,27
SiO <sub>2</sub>	5,74	12,86	13,84
TiO <sub>2</sub>	3,59	7,49	6,81
MgO	0,15	0,48	0,52
MnO	0,06	2,48	0,42
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,18	0,11	0,15
Na <sub>2</sub> O	3,87	2,52	6,04
ppc	14,78	—	16,14

O processo de reaproveitamento da lama vermelha foi estudado com o objetivo de desenvolver um material vítreo-cerâmico, reduzindo desta maneira seu elevado volume e, conseqüentemente, diminuindo o seu impacto ambiental.

A amostra foi caracterizada através das técnicas: análise química, difratometria de raios-x (determinação das fases mineralógicas), microscopia eletrônica de varredura (determinação da morfologia), espectroscopia por dispersão de energia de raios-x e mapeamento microscópico para análise e mapeamento das fases.

O fluxograma para obtenção do produto vítreo-cerâmico é mostrado na figura 3.6.

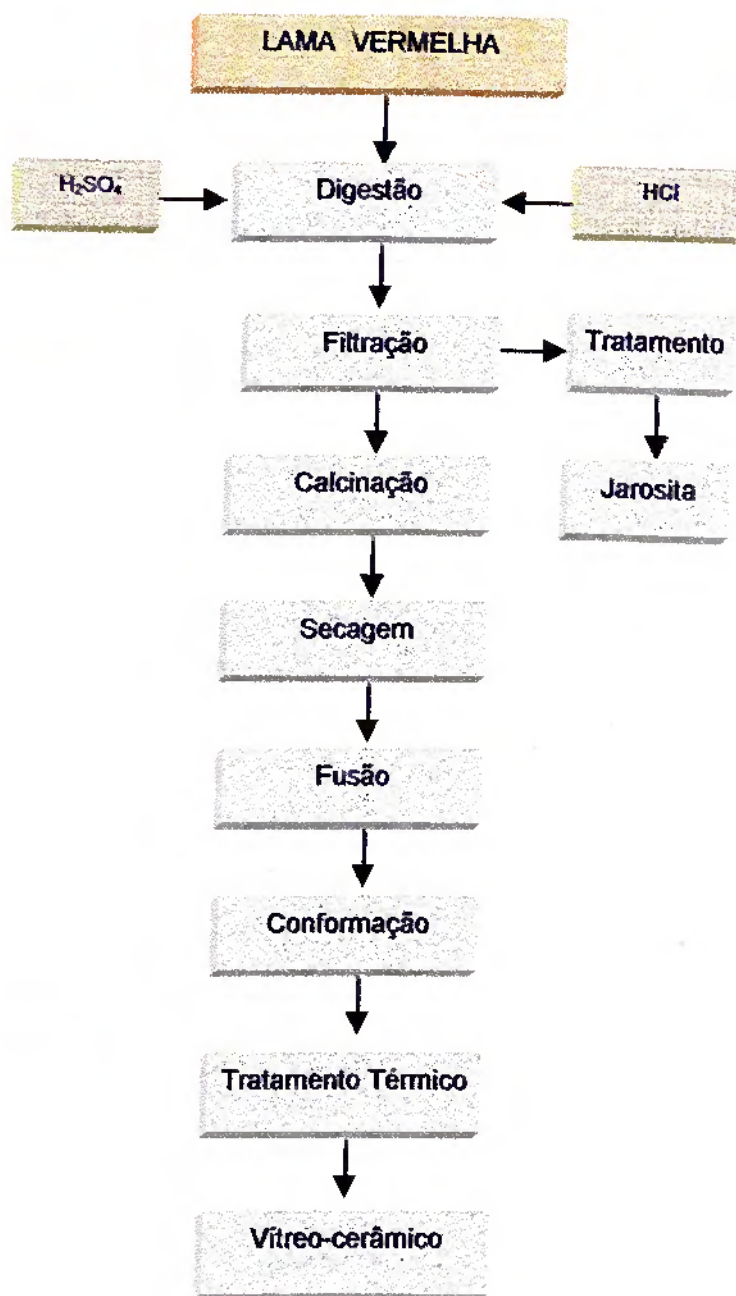


Figura 3.6

Fluxograma para obtenção do produto vítreo-cerâmico<sup>(43)</sup>

O vítreo-cerâmico foi caracterizado pelas mesmas técnicas utilizadas para o resíduo. Os resultados obtidos foram comparados com as propriedades do vidro plano, indicando que a fabricação de vítreo-cerâmica a partir de lama vermelha mostra-se tecnicamente viável.

### 3.3.1.5 - Sucatas Metálicas

As sucatas metálicas representam o maior percentual de geração de resíduos industriais. Hoje as sucatas ferrosas são reaproveitadas nos altos-fornos como carga metálica.

A recuperação das sucatas<sup>(44)</sup> contendo parte metálica e parte não metálica é realizada através das técnicas de tratamento (cominuição, peneiramento, classificação e separação magnética) ou outro método de concentração, dependendo de suas características e da forma posterior de reciclagem dos diferentes materiais.

Outro resíduo importante neste setor industrial são as latas de alumínio. Um exemplo claro são as latas recebidas pela empresa *Reynolds Latasa*<sup>(45)</sup> (única produtora nacional de latas de alumínio para bebidas), em seus pontos de coleta (escolas, supermercados e postos de gasolina), que valorizaram cerca de 2.900% em 1993. O processo funciona como um sistema fechado, a Latasa encaminha as latas para as empresas metalúrgicas, que transformam o material em lingotes de alumínio. O material é devolvido à Latasa para a fabricação das latas.

A metalurgia secundária do alumínio, como acontece em todos os processos de reciclagem, permite a economia de matérias-primas minerais e de energia. Assim, consomem-se 17000 kWh de energia elétrica para a produção de 1 tonelada de alumínio a partir do bauxito, enquanto que a mesma tonelada de alumínio é produzida por reciclagem com um consumo de 750 kWh. Portanto, o alumínio reciclado substitui o alumínio primário com um ganho de 95%<sup>(46)</sup>.

Outro aspecto positivo da reciclagem do alumínio está ligado ao impacto ambiental. A produção de 01 (uma) tonelada de alumínio primário implica no consumo de

aproximadamente 4 toneladas de bauxito e na produção de 2 (duas) toneladas de lama vermelha, além da emissão de fluoretos. Outra grande vantagem do processo de reciclagem do alumínio é apresentar um valor de mercado agregado à sucata<sup>(46)</sup>.

### **3.4 - Reciclagem de Rejeitos das Indústrias do Setor Mineral**

O programa de reaproveitamento de resíduos gerados pelas indústrias do setor mineral é ainda incipiente. Hoje, frente às implicações da procura de elevada produtividade, a indústria mineral tem mostrado mudanças, devido às transformações e ao esgotamento das reservas exploráveis, investimento, qualidade e preço e, principalmente, tendo em vista as questões ambientais.

Talvez, o setor mineral não priorizou o assunto devido às características de seus resíduos, que não apresentam periculosidade em termos de emissão de substâncias tóxicas. Seu maior impacto é ressaltado pela grande área devastada e pelo volume de material gerado, seja de estéril da lavra ou de rejeitos de concentração.

Hoje, as empresas de mineração<sup>(47)</sup> vêm desenvolvendo estudos para recuperação dos materiais depositados nas grandes barragens de rejeitos e bacias de contenção de finos de minério, com o objetivo de "explorar" os possíveis conteúdos de metais e mesmo buscar novas rotas tecnológicas para concentração de minérios de baixo teor.

A primeira tecnologia desenvolvida para o reaproveitamento dos minérios de ferro de baixo teor e com a granulometria fora das especificações de mercado trata-se do processo de aglomeração por pelotização.

De acordo com a revisão bibliográfica apresentada para os resíduos siderúrgicos, o processo de pelotização produz um aumento no conteúdo de ferro da mistura, tornando-o adequado para alimentar as plantas de sinterização, assim como as pelotas para alimentar os processos de redução direta.

Um estudo foi desenvolvido para reaproveitamento de finos de minérios de manganês<sup>(47)</sup> provenientes do Amapá e do Mato Grosso pelo processo de pelotização.

Inicialmente, os finos de minério e diferentes tipos de aglomerantes (bentonita, cal) foram caracterizados em termos de composição química, distribuição granulométrica, densidade, diâmetro médio e superfície específica. A partir da caracterização, os ensaios de pelotização foram realizados em um disco com diâmetro de 0,52 m, velocidade angular de 25 rpm e ângulo de inclinação de 30°, com adição de água até a umidade ótima para a operação. As pelotas verdes foram submetidas aos testes de qualidade, tais como: resistência à compressão e resistência à fadiga. As pelotas foram pré-aquecidas e secadas em estufas à temperatura de 110°C durante 1 hora. Em seqüência, as pelotas foram calcinadas até a temperatura de 1190°C, durante 1,5 horas, com a velocidade de aquecimento de 3,6°C/min.

Os resultados mostraram as melhores características de qualidade para pelotas verdes com a adição de bentonita. As pelotas calcinadas não crepitam e são física e quimicamente adequadas para a produção de ferro-ligas à base de manganês.

Os finos de calcário<sup>(48)</sup>, dependendo da sua composição química, são reaproveitados na fabricação de cimento, como corretivo de solos, ou como matéria-prima para a indústria química. Além dessas formas de reaproveitamento dos finos de calcário, a literatura descreve uma experiência desenvolvida nos Estados Unidos, tendo como objetivo aproveitar finos de cominuição de pedra de calcário. O processo consiste na aglomeração dos finos por pelotização, gerando pelotas capazes de resistir ao manuseio e transporte até a fábrica de cimento, desintegrando-se dentro do forno de calcinação. O problema ambiental foi minimizado e a produção da pedra foi aumentada em 15%.

Os estudos desenvolvidos no Brasil<sup>(49)</sup> para pelotização dos finos de calcário (-80#) mostraram que as pelotas são capazes de resistir ao manuseio e ao transporte por caminhão. Principalmente as pelotas ligadas com cimento Portland apresentaram elevada resistência à compressão e potencial de uso como agregado para concreto.

Além do cimento como aglomerante, foram utilizados os reagentes CMC (carboximetil-celulose) e HMF (hexametáfosfato de sódio) e barrilha de sódio. Os resultados mostraram que as pelotas contendo CMC e HMF degradam com o tempo, devido à solubilidade dos aglomerantes. Já as pelotas produzidas com barrilha apresentaram maior resistência.

## 4 - METODOLOGIA

A revisão bibliográfica apresenta diversas tecnologias para tratamento dos resíduos sólidos industriais, tecnologias estas aplicáveis nos processos industriais dos setores químico, mineral, siderúrgico, etc.. É abordada, também, a importância da metodologia de caracterização dos resíduos sólidos, iniciando-se pela realização da amostragem e identificação do processo gerador, seguindo-se pela adoção de técnicas e métodos apropriados para a caracterização física e química dos mesmos, os quais dependem logicamente das principais características apresentadas pelo resíduo em questão (estado físico, composição química, processo gerador, manuseio, sistema de descarte), e, principalmente, o sistema de tratamento proposto visando seu potencial de reciclagem.

As diferentes características (quantitativas e qualitativas) apresentadas pelos resíduos sólidos industriais, oriundas de diferenciações no processo gerador, impossibilitam o desenvolvimento de uma metodologia de trabalho, sem que sejam considerados:

- taxa de geração dos resíduos;
- caracterização do processo gerador (matérias-primas e insumos utilizados e descrição do processo);
- identificação da(s) causa(s) geradora(s) do resíduo;
- características físicas e químicas dos resíduos;
- classificação dos resíduos segundo as normas técnicas vigentes;
- identificação dos elementos indesejáveis e os limites máximos aceitáveis dependendo do tipo de tratamento a ser adotado.

Procurando-se identificar uma metodologia única para os estudos de tratamento de diferentes tipos de resíduos é proposto o desenvolvimento das seguintes etapas, conforme mostra a figura 4.1.

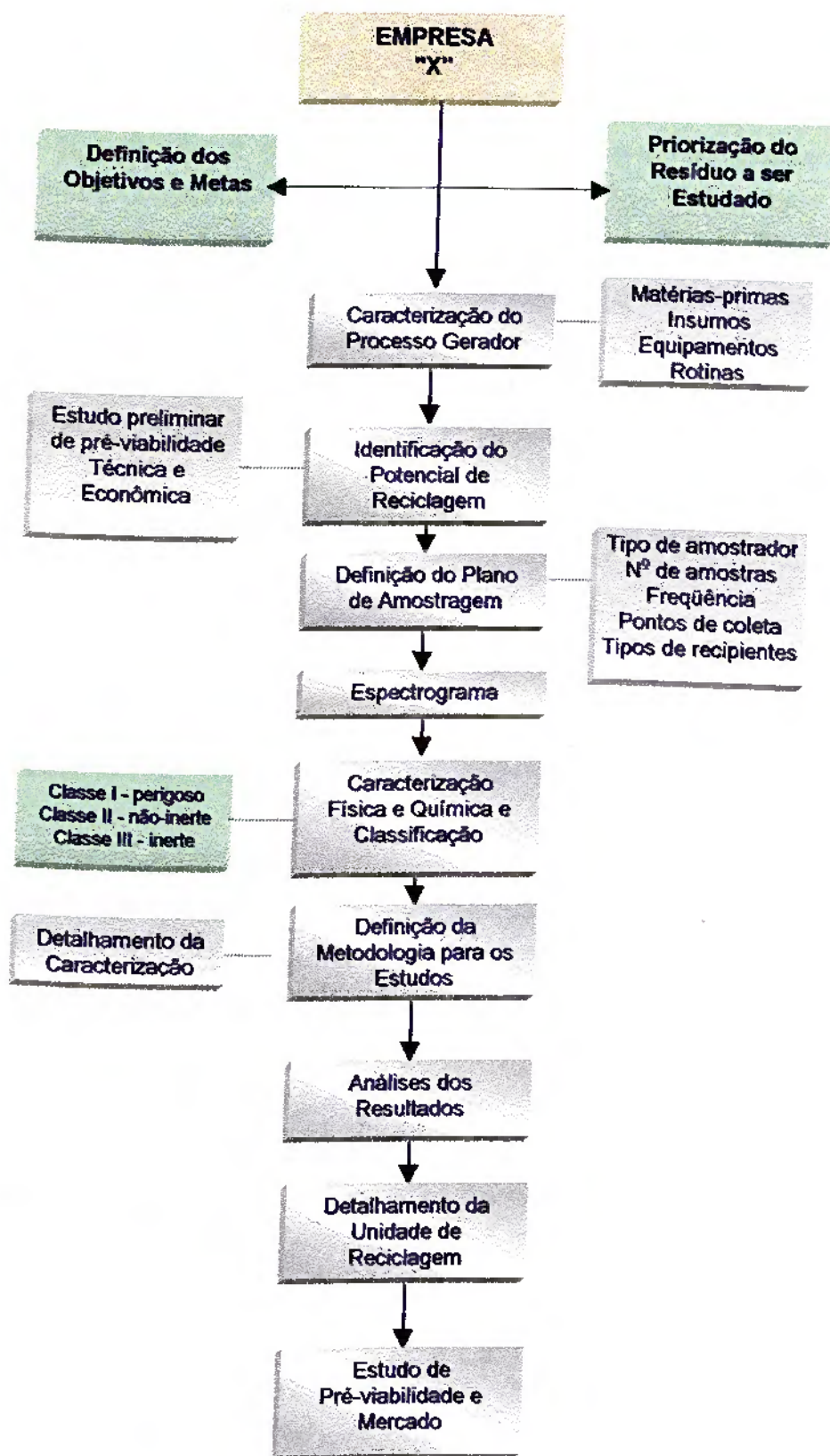


Figura 4.1

Fluxograma da metodologia para reciclagem de resíduos sólidos industriais

### ***1ª etapa: Identificação do resíduo sólido industrial***

O critério de seleção do resíduo a ser estudado depende da política ambiental e dos objetivos da empresa geradora. É fundamental implementar procedimentos operacionais e programas para a minimização da geração dos resíduos, reduzir ou substituir as matérias-primas pelas matérias-primas residuais ou que geram menor volume de resíduos, reciclar de acordo com a viabilidade técnica e econômica e evitar, sempre que possível, a disposição em solos, mesmo que controlados com segurança ambiental, a fim de evitar a criação de um passivo ambiental.

### ***2ª etapa: Caracterização do processo gerador do resíduo***

Na caracterização do processo gerador do resíduo são identificadas todas as entradas e as saídas do processo, operação e/ou atividade da empresa.

A caracterização das entradas é identificada quanto:

- às características físicas e químicas das matérias-primas utilizadas;
- às características dos insumos, principalmente quanto à sua composição química, a quantidade utilizada, o grau de toxicidade e a periculosidade;
- identificação das causas geradoras dos resíduos.

De posse dos dados de entrada, passa-se para a caracterização do processo, operação e/ou atividade geradora de resíduos, buscando identificar as possíveis reações ocorridas a partir das condições operacionais dos equipamentos e da mão-de-obra e suas variações, assim como realizar um balanço de material e energia do processo industrial.

As saídas são caracterizadas quanto ao volume gerado, frequência e condições operacionais para o descarte, variações de vazão, massa, densidade, teor de sólidos, alcalinidade/acidez e composição química.

### **3ª etapa: Planejamento da amostragem dos resíduos**

Com o conhecimento do processo gerador, o plano de amostragem dos resíduos é elaborado buscando atender às etapas de caracterização física e química e a realização dos ensaios de laboratório a partir de um material representativo e volume adequado para as aplicações.

A amostragem é realizada buscando atender a legislação e normas vigentes, como a NBR 10007/1987 - ABNT - Amostragem de Resíduos<sup>(7)</sup>.

A técnica de amostragem é estabelecida de maneira que as informações sejam representativas, para atender a proposição para o método de tratamento, podendo ser verificada através dos memoriais de caracterização dos resíduos, já existentes na indústria em questão.

Assim, as condições específicas do plano de amostragem, tais como: seleção do amostrador, seleção da embalagem da amostra, ponto de amostragem, número e volume de amostras são identificadas para cada estudo de caso, dependendo da forma de geração.

### **4ª etapa: Caracterização dos resíduos sólidos**

A caracterização do resíduo inicia-se com a realização das duas primeiras etapas, consideradas fundamentais na identificação do potencial de reciclagem do mesmo.

Os parâmetros selecionados para caracterização dependem, fundamentalmente, da rota tecnológica identificada para o resíduo visando o potencial de reciclagem. Caso o resíduo se apresente na forma sólida ou semi-sólida, os ensaios e os parâmetros básicos necessários a serem conhecidos são:

- classificação do resíduo segundo a ABNT/NBR10004/87<sup>(7)</sup> em: perigoso, inerte ou não inerte;
- percentagem de água;

- densidade;
- distribuição granulométrica;
- composição química em termos de orgânicos e inorgânicos.

Inicialmente, propõe-se a obtenção do espectrograma, a fim de determinar uma análise qualitativa dos principais constituintes da amostra e, posteriormente, a caracterização química quantitativa determinada através de espectroscopia de absorção atômica ou outros métodos analíticos dependendo do tipo do resíduo.

Concluída a caracterização preliminar do resíduo, outras técnicas e métodos mais aprimorados podem ser aplicados dependendo da necessidade, a fim de atender a futura aplicabilidade dos resultados, quando na análise da rota tecnológica proposta. Dentre as possíveis técnicas e métodos merecem menção:

- difração de raios-x: determinação das fases mineralógicas presentes;
- microscopia eletrônica de varredura: observação da morfologia;
- espectroscopia por dispersão de energia de raios-x: determinação dos elementos presentes nos grãos;
- espectrometria no infra-vermelho: identificação de compostos orgânicos presentes.

#### ***5ª etapa: Identificação das causas da geração dos resíduos, buscando técnicas de redução do volume gerado***

O principal objetivo no sistema de gestão de resíduos é minimizar a geração, seja através de substituição de matérias-primas, de insumos, de equipamentos, implementação de procedimentos operacionais e treinamento adequado para as pessoas envolvidas na atividade, processo e/ou serviço.

Uma operação fundamental no sistema de gestão de resíduos é a realização da segregação dos materiais. A simples mistura dos resíduos classificados como perigosos com outros resíduos inertes e não inertes tornará essa mistura perigosa ao meio ambiente, dificultando e onerando o sistema de disposição e a forma de tratamento.

Para uma maior eficiência desta etapa é necessário que a nova filosofia da estrutura organizacional da empresa esteja voltada para a interação entre o processo e o controle ambiental, onde cada gerência transforma-se em uma gerência ambiental. O comprometimento ambiental global inicia-se pela eliminação do desperdício (matérias-primas, insumos, energia, água, etc.) e melhoria nos processos produtivos.

**6ª etapa: Identificação da rota tecnológica para o sistema de tratamento do resíduo, a partir do seu potencial de reciclagem**

A rota tecnológica é identificada e avaliada para o resíduo em estudo, principalmente pela sua geração e características físicas e químicas, definindo-se assim as unidades operacionais básicas de forma a atender o mercado consumidor do produto reciclado:

- métodos de classificação: peneiramento;
- métodos de cominuição: britagem e moagem;
- métodos de concentração: separação magnética, eletrostática, densitária, flotação;
- processos pirometalúrgicos: aglomeração (pelotização ou briquetagem),
- processos hidrometalúrgicos: eletrólise, lixiviação, precipitação química seletiva;
- processos químicos: térmicos, petroquímicos, redução/oxidação, tratamentos físico-químicos, extração por solvente, etc..

**7ª Etapa: Avaliação do potencial de reciclagem**

Essa etapa do trabalho está diretamente relacionada à etapa anterior, pois, para alguns estudos de caso, faz-se necessário o desenvolvimento de tratamento do resíduo, a fim de adequá-lo à sua futura reutilização.

Em alguns estudos de casos, além da proposição da forma de tratamento, torna-se imperativo indicar, sempre que possível, os seguintes itens:

- valor do resíduo reciclado;
- usos mais nobres possíveis;
- custos de tratamento e transporte;

- vantagens colaterais obtidas pela destinação do resíduo ao setor produtivo, seja para aplicação primária, secundária ou terciária.

### **8ª Etapa: Análise do custo e benefício do processo de tratamento**

Nas situações em que os estudos sejam desenvolvidos em escala de laboratório, a análise do custo e benefício pode ser apresentada em linhas gerais, baseando-se em unidades e experiências semelhantes ao tratamento proposto.

Deve-se buscar sempre que possível, o desenvolvimento dos estudos dos resíduos em escala piloto para melhor definição das condições operacionais, tendo em vista as variações nas características físicas e químicas apresentadas pelos resíduos. Os custos e benefícios tornam-se mais reais através de um maior detalhamento dos investimentos e operacionalização do processo.

## **4.1 - Estudos Preliminares**

Os estudos preliminares iniciaram-se com o desenvolvimento do Projeto de Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais (1992), através do convênio firmado entre a instituição RHAEC/CNPq e a empresa BRANDT MEIO AMBIENTE com os seguintes objetivos:

- identificar metodologias e equipamentos de controle e reciclagem de resíduos industriais;
- desenvolver metodologias e procedimentos para implantação de reciclagem de resíduos;
- caracterizar o potencial de reciclagem de diversos resíduos em cooperação com entidades representativas dos setores industriais;
- capacitar a equipe técnica da Brandt Meio Ambiente para desenvolver estudos e projetos na área de reciclagem de resíduos sólidos industriais.

O projeto de Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais foi desenvolvido para diversas empresas do setor mineral e siderúrgico. Um dos estudos de caso consistiu na execução das 8 (oito) etapas que compõem a metodologia para reciclagem de dois resíduos, aqui denominados de subprodutos, gerados por uma indústria de fabricação de produtos trefilados.

Os trabalhos foram divididos em fases denominadas de Fase I e de Fase II para os subprodutos Torta da Estação de Tratamento dos Efluentes Acidulados e Carepa, conforme apresentado a seguir.

#### **FASE I -**

Convênio entre BRANDT e  
RHAÉ-CNPq

- Seleção e amostragem dos resíduos.
- Caracterização física e química dos resíduos.
- Identificação da(s) rota(s) básica(s) para tratamento dos resíduos.
- Avaliação do potencial de reciclagem.

#### **FASE II -**

Trabalhos desenvolvidos pelo  
contrato firmado entre  
BRANDT/Empresa de Produtos  
Trefilados

- Desenvolvimento dos estudos de aglomeração em escala de laboratório para o resíduo da Torta de Estação de Tratamento de Efluentes Acidulados para a reciclagem como mini-pelotas no processo siderúrgico de sinterização e/ou pelotas para a aplicação como carga para o alto-forno.
- Avaliação dos custos e benefícios para a implantação do projeto de reciclagem dos resíduos.

## **4.2 - Formulação da Hipótese**

A formulação da hipótese desta pesquisa consiste em aplicar a metodologia de reciclagem de resíduos sólidos industriais, através do desenvolvimento das 8 (oito) etapas propostas.

Os objetivos dos estudos para reciclagem da torta da ETEA e carepa consistiram, especificamente, em viabilizar suas reciclagens, eliminar os elevados custos de disposição em solo e, conseqüentemente, evitar a criação do passivo ambiental.

As proposições dos estudos consistiram na utilização dos resíduos, torta da ETEA e carepa, como subprodutos a serem alimentados nos altos-fornos e/ou nas usinas de sinterização.

Como uma etapa inicial e conceitual fez-se o levantamento dos insumos utilizados nos altos-fornos e nas usinas de sinterização com suas respectivas características físicas e químicas. A hipótese assumida é que a carga, constituída pelos subprodutos, alimentada nas unidades industriais não alteraria as especificações dos respectivos produtos e, também, não implicaria em alterações nas características dos tipos de emissões (atmosféricas, líquidas e resíduos sólidos) geradas.

#### *Composição básica da carga de cada alto-forno*

- Altos-fornos A, B e D: 60% sinter, 40% minério de ferro (NPO) e 100% carvão mineral;
- Alto-forno C: 80% sinter, 20% minério de ferro (NPO) e 100% coque;
- Alto-forno E: 85% sinter, 15% minério de ferro (NPO) e 100% coque.

A taxa de carregamento e a composição básica da carga metálica dos altos-fornos são apresentadas respectivamente nas tabelas IV.1 e VI.2.

**Tabela IV.1**

#### **Carregamento dos altos-fornos**

Alto-forno	Alto-forno A	Alto-forno B	Alto-forno C	Alto-forno D	Alto-forno E
<b>Carga (t/dia)</b>	540	724	646	420	1.100

Tabela IV.2

## Composição química da carga metálica dos altos-fornos

Parâmetros	Minério	Sínter	Carvão	Coque
Fe (%)	>64	>57	*	*
FeO (%)	*	9,5 a 13,0	*	*
SiO <sub>2</sub> (%)	<2,0	5,0 a 5,5	*	*
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	1,0 a 2,0	1,4	*	*
CaO (%)	*	8,20 a 9,10	*	*
MgO (%)	*	1,18 a 1,32	*	*
Mn (%)	<1,5	0,45 a 0,55	*	*
P (%)	<0,035	<0,06	*	*
Carbono fixo (%)	*		72	88
Matérias voláteis (%)	*		26	1,5
Enxofre (%)	*		*	0,7 (máximo)
Cinzas (%)	*		2	9,8 (máximo)

Os estudos conceituais foram desenvolvidos baseando-se na caracterização físico-química dos resíduos em questão, conforme dados exploratórios contidos na tabela IV.3.

Comparando-se os resultados das análises químicas da torta da ETEA e da carepa (tabela IV.3), com as características químicas dos insumos dos altos-fornos, observa-se que os resíduos apresentam o potencial para reaproveitamento como parte da alimentação dos altos-fornos, tendo em vista o conteúdo de ferro presente em cada amostra e as concentrações de metais pesados pouco significativas, quando comparados com a alimentação dos altos-fornos.

Sabe-se, contudo, que outros insumos são utilizados na carga de alto-forno, porém para efeito de cálculo preliminar considerou-se apenas aqueles portadores de ferro (sínter e NPO). O objetivo foi verificar se a alimentação da "torta da ETEA" e carepa causaria alteração significativa do conteúdo de ferro no processo siderúrgico.

Tabela VI.3

Resultados da caracterização da amostra bruta dos resíduos torta da ETEA e carepa

Parâmetros	% em peso	
	Torta da ETEA	Carepa
Densidade (em g/cm <sup>3</sup> )	1,34	NA
água	74,12	3,0
Fe	45,0	75,0
SiO <sub>2</sub>	4,7	2,5
P	NA	0,03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NA	0,25
MgO	0,75	0,25
CaO	12,9	NA
MnO	0,31	NA
S	0,22	NA
Pb	1,1	NA
Zn	0,54	NA
Na (ppm)	253	NA
B (ppm)	1180	NA

NA: não analisado.

A mistura da torta da ETEA + carepa com os demais insumos dos altos-fornos pode ser estudada a partir da seguinte equação:

$$X.x + Y.y + Z.z + W.w + \dots = M.m$$

Sendo:

X, Y, Z, W, ...: representam os volumes alimentados;

x, y, z, w, ...: representam os teores de cada elemento que compõe os materiais;

M: representa o peso da mistura final;

m: representa o teor de cada elemento após a mistura.

Várias proposições teóricas para a reciclagem dos resíduos carepa e torta da ETEA foram determinadas:

**1) Proposição 1 - Mistura da torta da ETEA + carepa com a carga metálica:**

AF - A: 30% torta da ETEA + 30% carepa;

AF - B: 50% torta da ETEA + 50% carepa;

AF - D: 20% torta da ETEA + 20% carepa.

Os cálculos foram efetuados considerando-se a carga com 60% sinter e 40% minério (NPO), uma vez que o percentual de ferro no quartzito não ultrapassa 2%.

Os resultados do balanço de massa da proposição 1 estão apresentados na tabela IV.4. As seguintes observações podem ser feitas:

**a) variação do peso no carregamento metálico total com a alimentação dos resíduos:**

AF-A: acréscimo de 0,30% na carga total;

AF-B: acréscimo de 0,31% na carga total;

AF-D: acréscimo de 0,26% na carga total.

Concluiu-se que essas variações são desprezíveis, se comparadas com o volume do carregamento total de carga metálica alimentada diariamente nos altos-fornos.

**b) teores dos elementos:** a mistura de minério e sinter apresenta o teor médio de 62,8% Fe e com a adição dos resíduos o teor médio passou a 62,76%, não indicando nenhuma alteração.

Teoricamente, o conteúdo dos demais componentes, principalmente chumbo, zinco, manganês e demais impurezas é considerado desprezível, se comparado com o volume da carga metálica. Contudo, medidas de controle deverão ser estudadas, tanto a nível ambiental quanto na qualidade do produto final, apesar de que mudanças tecnológicas ocorrerão, as quais implicarão na não utilização de insumos contendo chumbo no processo.

Tabela IV.4

Resultados dos balanços de massa para as proposições 1 e 2

Mistura da Torta da ETEA + carepa + as cargas metálicas dos AF-A, AF- B e AF-D

Carga	Minério (t/dia)	Sínter (t/dia)	Torta (t/dia)	Carepa (t/dia)	Proposição 1			Proposição 2
					AF-A	AF-B	AF-D	AF-A
sem residuo	*	*	*	*	540	725	420	540
AF - A	216	324	1,05	0,60	541,65	*	*	*
AF - B	289,8	434,7	1,75	1,0	*	727,10	*	*
AF - D	168	252	0,70	0,40	*	*	421,10	*
AF - A	216	324	3,5	2,0	*	*	*	545,5
<b>Composição Química</b>								
Fe (%)	67,0	60,0	45,0	75	62,78	62,78	62,78	62,73
SiO <sub>2</sub> (%)	<2,0	5,5	4,7	2,5	4,10	4,10	4,10	4,10
Mn (%)	<1,5	0,55	0,24	*	0,93	0,93	0,93	0,92
P (%)	<0,035	<0,06	*	0,03	0,05	0,035	0,050	0,05
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	2,0	1,5	*	0,25	1,69	1,69	1,69	1,68
CaO (%)	*	9,10	12,9	*	5,47	4,47	5,47	5,49
MgO (%)	*	1,32	0,75	0,24	0,79	0,79	0,79	0,79
S (%)	*	*	0,22	*	0,0004	0,0005	0,0003	0,001
Pb (%)	*	*	1,1	*	0,001	0,002	0,001	0,01
Zn (%)	*	*	0,54	*	0,001	0,001	0,0008	0,003
Na (ppm)	*	*	253	*	0,49	0,61	0,42	1,63
B (ppm)	*	*	1180	*	2,29	2,84	1,96	7,57
água (%)	<6,0	*	74,12	3,0	2,5	2,57	2,52	2,86

c) umidade da torta da ETEA: a torta apresenta uma elevada umidade (74,12%) e plasticidade, o que dificulta o seu manuseio e, possivelmente, a sua mistura com os demais materiais, através dos processos convencionais de homogeneização. Porém, isto poderá ser contornado com a mistura da torta + carepa, juntamente com finos de minério.

d) superfície específica: além da elevada umidade e plasticidade, a elevada superfície específica indica que a produção de aglomerados é a alternativa mais adequada.

## **II ) Proposição 2 - Mistura da torta da ETEA e carepa com a carga metálica do AF-A:**

Esta proposição foi elaborada com o objetivo de mostrar as vantagens em concentrar a adição dos resíduos em um único alto-forno.

Os resultados dessa proposição estão apresentados, também, na tabela IV.4. As seguintes observações podem ser feitas:

- a)** os resultados dos balanços de massa são aproximadamente iguais aos valores encontrados com a distribuição dos resíduos nos três altos-fornos;
- b)** ocorre minimização dos custos de transporte e manuseio dos resíduos, pois as atividades seriam concentradas em um único local;
- c)** a variação total no peso de carregamento é de 1,01%, insignificante, tendo em vista que não foram considerados todos os insumos e matérias-primas;
- d)** a diminuição no conteúdo de ferro foi de 0,11%, se comparado com o teor médio de ferro da mistura de sinter + minério (62,8% Fe).

## **III ) Proposição 3 - Mistura dos resíduos torta da ETEA + carepa + cargas metálicas dos AF-C e AF-E.**

Essa proposição objetiva analisar a variação da composição da carga metálica, quando um alto-forno a coque é alimentado com resíduos torta + carepa.

As seguintes proporções de mistura foram estudadas, considerando a capacidade dos altos-fornos:

- AF-C: 60% da torta + 40% carepa;
- AF-E: 40% da torta + 60% carepa;
- AF-C: 100% torta + 100% carepa.

Os resultados da proposição 3 estão apresentados na tabela IV.5.

**Tabela IV.5**

**Resultados dos balanços de massa para a proposição 3**

**Mistura da torta da ETEA e as cargas metálicas dos AF-C e AF-E**

Carga metálica	minério (t/dia)	sinter (t/dia)	torta (t/dia)	carepa (t/dia)	Proposição 3		
					AF-C	AF-E	AF-C
sem resíduo	*	*	*	*	646	1100	646
AF - C	129,2	516,8	1,05	0,60	648,2	*	*
AF - E	165,0	935,0	1,75	1,0	*	1103,3	*
AF - C	129,2	516,8	3,5	2,0	*	*	651,2
<b>Composição química</b>							
Fe (%)	67,0	60,0	45,0	75	61,38	61,03	61,38
SiO <sub>2</sub> (%)	<2,0	5,5	4,7	2,5	4,8	4,97	4,79
Mn (%)	<1,5	0,55	0,24	*	0,74	0,69	0,74
P (%)	<0,035	<0,06	*	0,03	0,05	0,06	0,05
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	2,0	1,5	*	0,25	1,59	1,57	1,59
CaO (%)	*	9,10	12,9	*	7,28	7,74	7,29
MgO (%)	*	1,32	0,75	0,24	1,05	1,12	1,05
S (%)	*	*	0,22	*	0,20(*)	0,22(*)	0,20(*)
Pb (%)	*	*	1,1	*	0,0023	0,0021	0,01
Zn (%)	*	*	0,54	*	0,0011	0,001	0,003
Na (ppm)	*	*	253	*	0,55	0,48	1,36
B (ppm)	*	*	1180	*	2,55	2,25	6,34
água (%)	<6,0	*	74,12	3,0	1,36	1,04	1,59

(\*) considerando o teor de enxofre na composição do coque.

O aumento da carga metálica é de 0,4% no AF-C, 0,3% no AF-E, quando se distribuem os resíduos nos dois altos-fornos. Já a alimentação de 100% dos resíduos gerados em um único alto-forno (AF-C) implicou no aumento de 0,8% na carga metálica.

Os resultados indicaram que a adição de 100% dos resíduos gerados diariamente no AF-C não altera significativamente a composição da carga. Contudo, os seguintes pontos foram ressaltados:

a) diminuição no conteúdo de ferro de 0,033% no AF-C e no AF-E;

b) o percentual de enxofre foi analisado. As presenças de 0,7% S na composição do coque e 0,22% S na composição da torta levaram à concentração de 0,20% S na mistura.

#### **IV - Proposição Final**

Com base nos levantamentos e características dos resíduos, o desenvolvimento dos estudos do processo de aglomeração através da pelletização em escala de laboratório se baseará na mistura de torta da ETEA + carepa + finos de minério de ferro com e sem adição de aglomerantes, com e sem a realização da queima.

Teoricamente, os resíduos torta da ETEA + carepa poderão ser recuperados e tratados em pequenas instalações no próprio local de geração, visando o aproveitamento das instalações já existentes, principalmente na área de disposição impermeabilizada dos resíduos.

Algumas opções para essa mistura/homogeneização/preparação dos resíduos serão estudadas, como: instalar o sistema de mistura em série com o filtro-prensa na própria estação de tratamento. Desta forma, os custos de transporte e de instalação seriam reduzidos. Uma outra opção é utilizar misturadores intensivos, podendo ser de forma contínua ou em batelada, com encamisamento a óleo, auxiliando a secagem.

#### **4.3 - Estudos Desenvolvidos**

Os estudos em laboratório tiveram como objetivo aplicar a metodologia para reciclagem de resíduos sólidos, através do desenvolvimento das 8 (oito) etapas descritas no item 4 - Metodologia. Os resíduos sólidos estudados, aqui denominados subprodutos, foram selecionados baseando-se nas características quantitativas e qualitativas: maior volume de geração e características físico-químicas que identificam o seu grau de periculosidade ao meio ambiente, causando impactos ambientais significativos e gerando um grande passivo ambiental para a empresa geradora.

O desenvolvimento dos estudos do processo de pelletização em escala de laboratório baseou-se na mistura de torta da ETEA + carepa + finos de minério de ferro, cujas caracterizações são apresentadas a seguir.

#### 4.3.1 - Caracterização dos Resíduos

##### 4.3.1.1 - Torta da Estação de Tratamento de Efluentes Acidulados - ETEA

###### *Processo Gerador*

A torta da ETEA é gerada na estação de tratamento de efluentes líquidos acidulados, efluentes estes originados pelos processos de tratamento dos fios-máquina e arames, conforme fluxograma apresentado na figura 4.2.

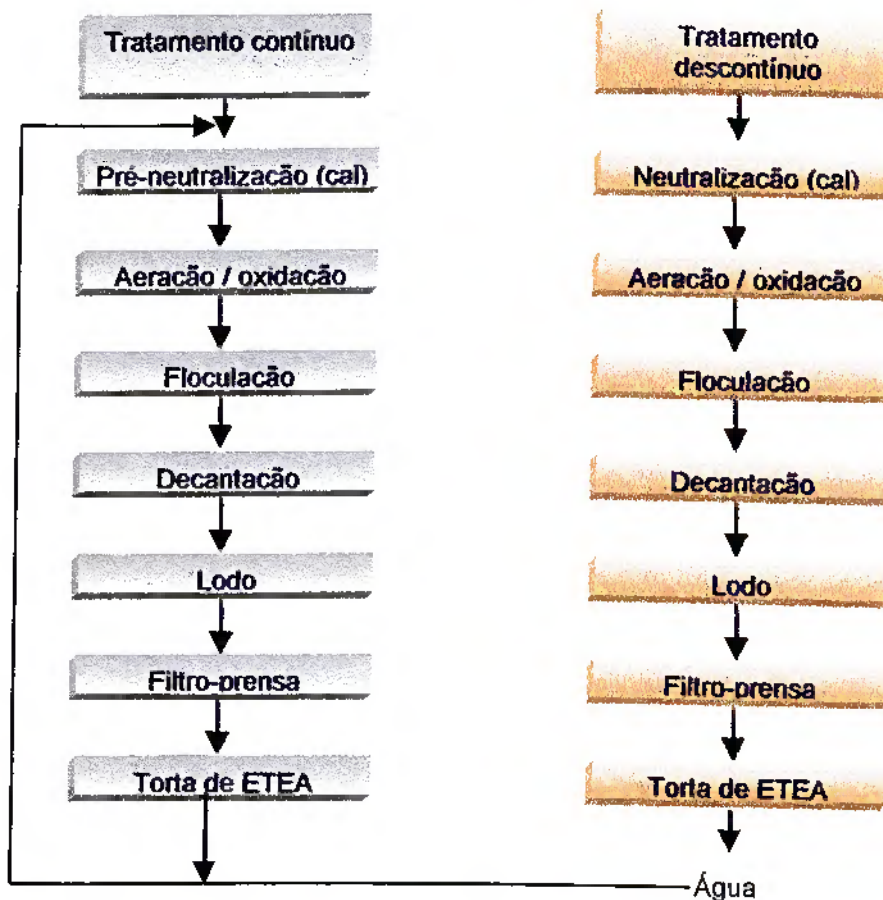


Figura 4.2

Fluxograma da Estação de Tratamento de Efluentes Acidulados

O sistema de tratamento de efluentes consiste na neutralização com cal, seguida da etapa de aeração/oxidação com ar comprimido, para posterior floculação, decantação e prensagem. Os produtos originados deste processo são: o efluente da prensagem, que retorna para o tanque de captação do tratamento contínuo, e o resíduo prensado, denominado de torta da ETEA.

Este resíduo consiste numa das grandes preocupações da empresa, geradora, devido ao elevado volume gerado e, principalmente, ao elevado custo de disposição. Este resíduo vem sendo depositado em células com revestimentos de impermeabilização compostos por material argiloso compactado, material asfáltico e de concreto. Além disso, este depósito representa um grande passivo ambiental a ser monitorado e controlado durante um longo período.

### ***Amostragem***

A amostragem foi realizada segundo a ABNT/NBR - 10007/87<sup>(7)</sup>, sendo coletada a amostra da torta da ETEA logo após a sua prensagem em diferentes pontos da caçamba da seguinte forma:

- a coleta da amostra foi realizada em cinco dias, nos três horários da operação de prensagem (03 vezes ao dia) e de geração do resíduo;
- após cada prensagem foi coletada uma amostra composta com aproximadamente 15 kg em cinco pontos da caçamba (04 vértices e 01 ponto central) e acondicionada em saco plástico;
- no final de cada dia de amostragem, as amostras de 15 kg foram misturadas e homogeneizadas, obtendo-se assim uma amostra composta diária de 225 kg;
- no final dos 05 dias de amostragem, as amostras compostas diárias foram misturadas e homogeneizadas totalizando uma amostra de 1.125 kg.

Durante a amostragem dos resíduos, a geração média da torta da ETEA é de 105 t/mês, com estimativa de crescimento para 245 t/mês com a entrada em operação da nova unidade de tratamento de efluentes.

### Caracterização e classificação da torta da ETEA

A torta da ETEA foi caracterizada segundo a norma NBR10004/87<sup>(7)</sup> com o objetivo de identificar sua classificação como resíduo Classe I, II ou III. Os resultados dos ensaios de lixiviação e de solubilização da torta da ETEA são apresentados na tabela IV.6.

**Tabela IV.6**

**Resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização da torta da ETEA<sup>(2)</sup>**

Parâmetros	Ensaio de Lixiviação		Ensaio de Solubilização	
	Concentração mg/L	Concentrações estabelecidas pela NBR10004	Concentração mg/L	Concentrações estabelecidas pela NBR10004
Cloretos	1.255,97	NL	<u>9.157,24</u>	<u>250,0</u>
Fluoretos	<0,05	150,0	<0,05	1,50
Ferro	61,40	NL	<u>1,17</u>	<u>0,3</u>
Manganês	2,80	NL	<0,01	0,1
Sílica	97,0	NL	201,20	NL
Cálcio	1.113,37	NL	<u>4.783,20</u>	<u>500,0</u>
Magnésio	154,64	NL	489,85	NL
Chumbo	0,29	5,0	<u>0,54</u>	<u>0,05</u>
Zinco	0,47	NL	0,07	5,0
Cromo Hex.	<0,01	5,0 Cr total	<0,01	0,05 Cr total
Cromo Trí.	<0,01	NL	<0,01	NL
Bário	<0,01	100,00	<0,01	1,0
Sódio	9,30	NL	65,50	200,0
Dureza total de CaCO <sub>3</sub>	3.401,97	NL	<u>13.917,00</u>	<u>500,0</u>

NL: Parâmetros não listados pela norma NBR10004.

A torta da ETEA é classificada como resíduo classe II - não inerte, por apresentar as concentrações de chumbo, ferro, dureza de cálcio e cloro superiores aos limites estabelecidos para o ensaio de solubilização (Listagem 8 - NBR10004/87)<sup>(7)</sup>.

### **Caracterização física e química da Torta da ETEA**

A amostra da torta da ETEA foi caracterizada quimicamente através da técnica de Espectrometria de Plasma de Indução. Os resultados da caracterização são apresentados na tabela IV.7.

**Tabela IV.7**

#### **Resultados da caracterização física e química da Torta da ETEA**

<b>Parâmetros</b>	<b>% em peso</b>
Densidade	1,34 g/cm <sup>3</sup>
Umidade	74,12
Fe	37,20
Mn	0,26
SiO <sub>2</sub>	4,92
CaO	15,95
MgO	1,03
TiO <sub>2</sub>	0,17
Cloretos	0,3
P	0,08
S	0,17
Pb	0,42
Zn	0,04
Na	0,05
Perda ao fogo	+1,91

Outras técnicas utilizadas na caracterização foram<sup>(2)</sup>:

- Difração de raios-x: a análise detectou a presença de óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).
- Fluorescência de raios-x:
  - elemento maior: Fe
  - elementos menores: Zn, Cl, Ca
  - elementos traço: Mn, K, Si, Mg

### Caracterização granulométrica

A caracterização granulométrica foi realizada através das técnicas de peneiramento e *ciclosizer*, devido à presença de partículas de pequeno tamanho.

Os resultados obtidos são apresentados na tabela IV.8.

Tabela IV.8

#### Resultados da caracterização granulométrica da Torta da ETEA

Abertura ( $\mu\text{m}$ )	% acumulada
<b>Peneiramento</b>	
1000	0,03
500	0,17
250	0,58
149	1,10
105	1,42
74	1,85
53	1,97
44	2,46
<44	97,54
<b>Ciclosizer</b>	
29	2,92
21	3,38
15	4,41
11	8,26
8	11,28
<8	88,72

Os resultados indicam que 97,54% do material encontra-se abaixo de 44  $\mu\text{m}$  e 88,72% abaixo de 8  $\mu\text{m}$ , uma faixa bastante fina.

#### **4.3.1.2 - Carepa de trefilação e decalaminação**

##### ***Processo Gerador***

A decalaminação consiste nas operações de decapagem mecânica para a preparação do fio-máquina para os processos de galvanização, patenteamento, cobreamento e latonagem gerando o resíduo denominado de carepa.

No processo de trefilação o fio-máquina é tracionado a frio através de matrizes em metal duro (aço de tungstênio), tendo seu diâmetro gradativamente reduzido até a bitola desejada. Utiliza-se sabão sólido para viabilizar o processo.

Quando não se utiliza o sabão o processo é designado como decalaminação, decapagem mecânica. Neste processo faz-se o dobramento do fio-máquina em um decalaminador de três roldanas, o que causa a quebra da fina e dura camada de óxido de ferro, gerando-se a carepa.

##### ***Amostragem da Carepa***

A carepa utilizada nos estudos foi coletada nos processos de trefilação e de decalaminação. A geração média é de 75 t/mês. As amostras de carepa foram coletadas em cada uma das caixas coletoras existentes em cada máquina, realizando-se quatro amostragens por dia, durante 05 dias.

Cada amostra diária foi misturada e homogeneizada e, no final do período de coleta, totalizava uma amostra composta de 100 kg.

##### ***Caracterização e classificação do resíduo - Carepa***

A carepa foi caracterizada segundo a norma NBR10004/87<sup>(7)</sup>. Os resultados dos ensaios de lixiviação e de solubilização da amostra do resíduo de carepa são apresentados na tabela IV.9.

Tabela IV.9

Resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização da carepa<sup>(2)</sup>

Parâmetros	Ensaio de Lixiviação		Ensaio de Solubilização	
	Concentração mg/L	Concentrações estabelecidas pela NBR10004	Concentração mg/L	Concentrações estabelecidas pela NBR10004
Cloretos	3,50	NL	112,0	250,0
Fluoretos	<0,05	150,0	<0,05	1,50
Ferro	0,80	NL	<u>0,30</u>	<u>0,3</u>
Manganês	0,03	NL	<0,01	0,1
Sílica	0,25	NL	0,50	NL
Cálcio	60,52	NL	79,59	500,0
Magnésio	4,15	NL	2,07	NL
Chumbo	<0,03	5,0	<0,03	0,05
Zinco	0,11	NL	<0,05	5,0
Cromo Hexa	<0,01	5,0 Cr total	<0,01	0,05 Cr total
Cromo Tri	<0,01	NL	<0,01	NL
Bário	<0,10	100,00	0,20	1,0
Sódio	2,60	NL	3,30	200,0
Dureza total de CaCO <sub>3</sub>	167,88	NL	207,28	500,0

NL: Parâmetros não listados pela norma NBR10004.

Segundo a ABNT/NBR 10004/1987<sup>(7)</sup>, a carepa é classificada como resíduo classe II - não inerte por apresentar a concentração de ferro no valor limite estabelecido pela norma NBR10004 (Listagem 8 - NBR10004/87)<sup>(7)</sup>.

#### Caracterização física e química da Carepa

A amostra de carepa foi caracterizada quimicamente através da técnica de Espectrometria de Plasma de Indução. Os resultados da caracterização são apresentados na tabela IV.10.

**Tabela IV.10****Resultados da caracterização física e química da carepa**

Parâmetros	% em peso
Densidade	5,39 g/cm <sup>3</sup>
Umidade	3,0
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	73,60
SiO <sub>2</sub>	2,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,08
P	0,02
MgO	<0,02
Perda ao fogo	-6,48

A análise semiquantitativa e qualitativa, realizada através da difração de raios-x, indicou que a carepa é constituída de três óxidos distintos: wustita, magnetita e hematita. A análise realizada através de metalografia quantitativa indicou a composição relativa média de 80% de wustita e 20% de magnetita e em algumas análises identificou-se a ocorrência de hematita.

**Caracterização granulométrica**

A caracterização granulométrica foi realizada através das técnicas de peneiramento. Os resultados obtidos são apresentados na tabela IV.11.

**Tabela IV.11****Resultados da caracterização granulométrica da carepa**

Abertura (µm)	% acumulada
1000	1,33
500	6,71
250	24,10
149	42,16
105	55,08
74	67,28
53	70,94
44	78,26
<44	21,74

### 4.3.1.3 - Finos de minério de ferro

#### *Processo Gerador*

A amostra dos finos de minério de ferro, denominada de Pellet Feed Fines, foi obtida do processo de tratamento mineral (britagem, concentração por flotação) da Usina de Alegria da empresa SAMITRI - S. A. Mineração da Trindade.

#### *Amostragem*

A amostra de Pellet Feed Fines coletada foi secada numa estufa à temperatura de 105°C, considerando-se a possibilidade futura de utilização de finos de minério de ferro resultantes dos sistemas de controle das emissões atmosféricas das unidades de sinterização.

#### *Caracterização Química dos Finos de Minério de Ferro*

A caracterização química foi realizada por Espectrometria por Absorção Atômica. Os resultados são apresentados na tabela IV.12.

**Tabela IV.12**

#### **Caracterização química dos finos de minério de ferro**

<b>Parâmetros</b>	<b>% em peso</b>
Fe	68,22
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,17
MgO	0,018
SiO <sub>2</sub>	0,85
TiO <sub>2</sub>	0,015
Mn total	0,022
CaO	0,007
P	0,035
Perda ao fogo	1,08

### **Caracterização granulométrica**

A caracterização granulométrica foi realizada através das técnicas de peneiramento. Os resultados obtidos são apresentados na tabela IV.13.

**Tabela IV.13**

#### **Resultados da caracterização granulométrica dos finos de minério de ferro**

<b>Abertura (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>% Acumulada</b>
1000	-
500	1,42
250	5,67
149	15,02
105	26,35
74	44,76
53	56,66
44	61,76
<44	38,24

#### **4.3.2 - Equipamentos utilizados**

##### **Misturador**

Para a preparação da mistura da torta da ETEA + carepa + finos de minério de ferro utilizou-se um misturador tipo "batedeira" com capacidade para 50 kg. Este equipamento foi utilizado devido às características de elevada umidade e plasticidade da torta da ETEA.

Foram misturados os materiais em diferentes proporções, a fim de atingir a umidade desejada da mistura a ser pelletizada, da ordem de 15%, conforme indicações da literatura<sup>(50)</sup>.

## **Disco Pelotizador**

Foram produzidas pelotas e mini-pelotas em um pelotizador de disco da marca CIMAQ, apresentando pratos de 400 e 600 mm de diâmetros, regulagem mecânica do ângulo de inclinação do prato de 0° a 90° e da velocidade de 0 a 60 rpm.

## **Peneirador**

As pelotas produzidas foram peneiradas num peneirador de acionamento elétrico produzido pela PRODUTEST, utilizando-se peneiras com aberturas normatizadas pela ABNT.

## **Forno de Queima**

A queima das pelotas e das mini-pelotas foi realizada num forno elétrico, onde foram definidos e ajustados o tempo e a temperatura da queima, fatores estes que promovem a alta resistências das pelotas e mini-pelotas.

## **4.4 - Desenvolvimento dos Testes de Pelotização**

### **4.4.1 - Testes realizados**

Os testes objetivaram estabelecer a proporção dos materiais constituintes da mistura a pelotizar e os parâmetros operacionais do processo de pelotização.

A proporção entre os materiais para a alimentação no disco pelotizador foi estabelecida em função da umidade inicial da mistura a pelotizar e da umidade final desejada para a pelota e mini-pelotas. Segundo a literatura<sup>(50)</sup>, os valores iniciais de umidade indicam a faixa de 8 a 15% como a faixa de umidade ótima para o processo de pelotização.

Foi preparada uma série de amostras com massas de 500 g e 3000 g, em proporções diferentes de finos de minério de ferro, carepa e torta da ETEA: 5:1:1, 6:1:1, 7:1:1 e 8:1:1.

Verificou-se que o melhor desempenho do método de aglomeração por pelotização, ou seja maior quantidade de pelotas consistentes produzidas, foi quando se partia de uma mistura com umidade de 7% a partir da proporção 8:1:1 (finos de minério, carepa e torta da ETEA), adição de água durante o tempo de pelotização numa vazão tal que no final do processo de pelotização a umidade final das pelotas era de 11%.

Inicialmente, a cal foi utilizada como agente aglomerante. Contudo, verificou-se visualmente que tanto a pelota quanto a mini-pelota não apresentavam consistência e resistência mecânica adequada. A cal foi substituída pela bentonita na produção das pelotas para alto-forno. Já na produção das mini-pelotas, a cal foi substituída pela mistura de bentonita mais silicato de sódio como agente aglomerante.

As amostras das misturas dos materiais foram alimentadas no disco pelotizador com o objetivo de definir os parâmetros operacionais: ângulo de inclinação, velocidade do disco, peso da massa alimentada, umidade da mistura e a quantidade de água alimentada durante o processo de pelotização.

Segundo a literatura<sup>(51)</sup>, devido à variedade de parâmetros operacionais, obedeceu-se um modelo matemático para a operação do disco, sendo que a condição ótima de operação do disco ocorre quando o material não pelotizado começa a mover sobre o plano inclinado antes de alcançar o ponto mais alto do disco pelotizador. Estas condições operacionais podem ser escritas a partir da seguinte equação:

$$\frac{\text{Sen}(\gamma - \phi)}{\text{cos}\phi} = 0,56 \times 10^{-3} \times N^2 \times D$$

N: Velocidade de rotação do disco em rpm;

$\gamma$ : inclinação do disco em relação à horizontal;

$\phi$ : ângulo de repouso do material não pelotizado;

D: diâmetro do disco pelotizador.

A velocidade de rotação do disco e a inclinação do disco foram otimizadas para o tipo de mistura a ser pelletizada até a obtenção de pelotas com tamanho desejado.

Conforme dados de literatura<sup>(50,51)</sup>, sabe-se que velocidades excessivas do prato pelletizador reduzem e ocasionam a quebra das pelotas através do impacto entre si e com a parede do disco pelletizador e, conseqüentemente, diminuindo sua resistência mecânica e aumentando a geração de finos.

Além disso, outra variável do processo é o teor de umidade. As condições do processo tornam-se extremamente sensíveis a pequenas alterações na alimentação de água, tendo em vista que trata-se do parâmetro fundamental para o desenvolvimento dos estágios do processo de pelletização.

### Parâmetros operacionais

Os parâmetros operacionais obtidos nos testes laboratoriais para pelletizar a mistura da torta da ETEA e carepa com os finos de minério de ferro são apresentados na tabela IV-14.

**Tabela IV-14**

#### Parâmetros operacionais determinados no processo de pelletização

Parâmetros	Pelotas ( $\phi = 10$ a 12 mm)	Mini-pelotas ( $\phi = 5$ a 6 mm)
Inclinação do disco	45°	45°
Velocidade do disco	21 rpm	18 rpm
Diâmetro do disco	600 mm	600 mm
Alimentação de água	50 mL/min	50 mL/min
Tempo de pelletização	10 min	5 min
Umidade da mistura	7%	7%
Umidade final das pelotas e mini-pelotas	11%	11%
Peso da mistura	3,1 kg	3,1 kg
% em peso do PFF	79,5%	77,0%
% em peso da carepa	9,75%	9,7%
% em peso da torta da ETEA	9,75%	9,7%
% em peso da bentonita	1%	1%
% em peso do silicato de sódio	Não aplicado	2,5%

O concentrado de minério de ferro e a carepa foram homogeneizados num misturador mecânico e seguiram para a etapa de quarteamento para obter uma amostra representativa. A torta da ETEA devido à sua elevada plasticidade e umidade foi homogeneizada num misturador tipo "batedeira". O tempo de homogeneização adotado para cada material foi de 30 minutos.

Após a homogeneização, os materiais foram pesados adotando-se a umidade da mistura de 7% , a partir da proporção 8:1:1 (finos de minério, carepa e torta da ETEA) para uma massa total de 3,1 kg. A mistura foi homogeneizada durante 15 minutos.

A mistura final contendo 3,1 kg e 7% de umidade foi alimentada no disco pelotizador, previamente preparado com a inclinação de 45° e velocidade de 21 rpm e 18 rpm, respectivamente, para produção de pelotas e mini-pelotas.

O tempo de pelotização foi de 10 min e 5 min, respectivamente, para a produção de pelotas e mini-pelotas.

O principal parâmetro identificado no processo consistiu na alimentação de água, onde os melhores resultados foram obtidos a partir da alimentação de 50 mL/min.

### **Secagem e queima das pelotas e mini-pelotas**

As pelotas e mini-pelotas produzidas contendo 11% de umidade foram dispostas em bandejas, permanecendo por um período de 24 horas para perda de água, quando então eram enviadas para o forno de queima.

As pelotas e mini-pelotas produzidas foram separadas em lotes de 40 kg e colocadas no interior de cadinhos numa espessura máxima de 20 cm.

O ciclo de queima (temperatura x tempo) foi determinado simulando as etapas de secagem, aquecimento das pelotas secas, queima e resfriamento das pelotas cozidas, visando à aplicação das pelotas como carga para altos-fornos e das mini-pelotas como carga para a sinterização.

*Ciclo de queima das pelotas:*

Aquecimento do forno até a temperatura de 100°C: 1 hora;

Temperatura mantida em 100°C: 3 horas;

Aquecimento do forno até a temperatura de 1350°C: 12 horas;

Temperatura mantida em 1350°C: 5 horas;

Resfriamento do forno até atingir a temperatura na ordem de 150°C: 9 horas.

*Ciclo de queima das mini-pelotas:*

Aquecimento do forno até a temperatura de 100°C: 1 hora;

Temperatura mantida em 100°C: 3 horas;

Aquecimento do forno até a temperatura de 800°C: 7 horas;

Temperatura mantida em 800°C: 5 horas;

Resfriamento do forno até atingir a temperatura na ordem de 50°C: 12 horas.

## 5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 - Caracterização química das pelotas e das mini-pelotas

As pelotas e mini-pelotas produzidas foram analisadas quimicamente, obtendo-se os resultados apresentados na tabela V.1.

Tabela V.1

Resultados da caracterização químicas das pelotas e mini-pelotas

Parâmetros	Pelotas	Mini-pelotas
Fe (%)	65,8	58,5
SiO <sub>2</sub> (%)	3,6	4,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,89	1,1
CaO (%)	0,59	0,65
MgO (%)	0,20	0,25
Mn (%)	0,098	0,097
TiO <sub>2</sub> (%)	0,12	0,16
P (%)	0,03	0,035
S (%)	<0,005	<0,005
Cl (%)	<0,002	<0,002
Pb (ppm)	60	62
Zn (ppm)	66	68
Na (ppm)	648	660
Perda ao fogo (%)	0,11	0,10

Conforme apresentado no item 4.2 - Formulação da Hipótese, os resultados das análises químicas dos produtos indicam que as concentrações dos parâmetros atendem às características das matérias-primas utilizadas nos processos siderúrgicos. Os elementos químicos considerados como nocivos aos processos (Cl, Na, Pb, Zn) apresentam uma baixa concentração, ressaltando que a carga alimentada do produto (pelota ou mini-pelota) é insignificante, se comparada com as cargas convencionais alimentadas nos processos siderúrgicos.

## 5.2 - Ensaio de Qualidade

Na avaliação da qualidade das pelotas e mini-pelotas produzidas foram estabelecidos os ensaios de Tamboramento e Abrasão, Resistência a Compressão e Redutibilidade, uma vez que trata-se do desenvolvimento de um estudo fundamental para verificar a viabilidade técnica e as melhorias durante o manuseio dos produtos originados dos subprodutos, até então, considerados como resíduos. Os resultados destes ensaios permitem conhecer o percentual de finos a ser gerado nas operações do manuseio e o percentual de finos para o retorno no processo.

Os ensaios de qualidade foram realizados de acordo com as metodologias normatizadas pela Série *International Standards Organization*.

### Ensaio de Tamboramento e Abrasão

Os ensaios de tamboramento e abrasão possuem a finalidade de avaliar a resistência ao desgaste das pelotas curadas, quando submetidas às ações simultâneas de rolamento e de choque, prevalentes nas operações de manuseio e de transporte e mesmo dentro do processo siderúrgico.

Pela Norma ISO3271/1985, o ensaio consiste em submeter uma amostra de 15 kg de pelotas com a faixa granulométrica de 10 a 12,5 mm, a um processo de revolvimento em tambor rotativo (diâmetro interno de 1.000 mm e comprimento de 500 mm) com velocidade de rotação de 25 rpm. Ao final de 200 revoluções, o material é submetido ao ensaio de peneiramento.

O peneiramento é realizado nas peneiras com aberturas de 6,3 mm e 500  $\mu$ m, cujos resultados indicam:

- índice de tamboramento (T): expresso em percentagem acima de 6,3 mm;
- índice de abrasão (A): expresso em percentagem abaixo de 500  $\mu$ m.

Os resultados dos ensaios foram:

<i>Ensaio</i>	<i>Valores obtidos</i>	<i>Valores desejáveis<sup>(50)</sup></i>
Tamboramento	> 6,3 mm: 82,08 %	94 %
Abrasão	< 0,5 mm: 16,99 %	5 %

Os resultados indicam que as pelotas não apresentam características adequadas segundo aos valores aceitáveis, implicando na potencialidade de geração de finos. Este efeito poderá ser reduzido alterando as condições operacionais da formação das pelotas.

#### *Ensaio de Resistência à Compressão*

Os ensaios de resistência à compressão objetivam avaliar a resistência das pelotas quando submetidas às ações mecânicas de carga e queda sucessivas provenientes das operações de manuseio, empilhamento e transporte. O ensaio é destrutivo e cada pelota tem seu valor medido, individualmente, na faixa granulométrica especificada após rompimento pela prensa hidráulica.

Neste ensaio os principais parâmetros avaliados são: faixa granulométrica entre 10 e 12,5 mm e número de pelotas superior a 60. Neste caso, as mini-pelotas não foram avaliadas devido à faixa granulométrica entre 4 e 6 mm. O resultado final é representado pela média aritmética dos valores individuais determinados em kgf/pelota ou N/pelota.

Os ensaios de resistência à compressão realizados mostraram que a média aritmética obtida no teste foi de 2.897,5 N/pelota, sendo que o valor desejável pelos padrões de qualidade é de 2.000 N/pelota.

#### *Ensaio de Redutibilidade*

O ensaio de redutibilidade consiste na determinação da perda de peso de uma amostra de pelotas, provocada pela remoção do oxigênio combinado com o ferro, através da ação de um gás redutor a alta temperatura, simulando, assim, as condições operacionais do processo siderúrgico.

Os resultados dos ensaios de redutibilidade foram:

<i>Materiais</i>	<i>% de redução obtidos</i>	<i>% de redução desejáveis</i>
Pelotas	53,4	55 a 75
Mini-pelotas	82,0	Não existe padrão

### **5.3 - Simulações de Utilização das Pelotas e das Mini-pelotas Produzidas**

Os ensaios de pelotização e ensaios de qualidade desenvolvidos consideram a produção de pelotas e mini-pelotas numa relação finos de minério de ferro:carepa:torta de 8:1:1. Esta relação foi alcançada ainda nos ensaios iniciais em função da umidade inicial da mistura de 7% e umidade final das pelotas e das mini-pelotas em 11%, quando os objetivos eram de encontrar pelo menos uma relação que viabilizasse tecnicamente o processo de pelotização. Os valores de umidade medidos que determinaram a relação de 8:1:1 foram: finos de minério de ferro =  $10 \pm 1\%$ ; carepa =  $0,14 \pm 0,5\%$  e torta da ETEA =  $71,1 \pm 2\%$ .

Quanto menor for a relação finos de minério de ferro + carepa + torta da ETEA, menor será o custo do processamento e da pelota final. A menor relação é estabelecida quando a mistura na proporção entre os componentes proporciona uma mistura com umidade máxima de 11%, ou seja, correspondente à umidade final da pelota. Nesta condição limite não é necessário adicionar água no processo de pelotização.

O concentrado de minério de ferro comercial utilizado (PFF) apresenta uma umidade na pilha de cerca 10%. A mistura do PFF comercial com uma torta com 71% de umidade, na proporção de 8:1, define uma mistura com umidade bastante superior a 11%. Desta forma, para que se viabilize tecnicamente uma mistura com no máximo 11% de umidade, torna-se necessária uma pré-secagem do PFF e/ou da torta.

Considerando que, num processo de revolvimento e aeração, se consiga reduzir cerca de 50% de umidade original do PFF comercial, passando de 10% para 5%, ou da torta da ETEA de 71,1% para 35%, alcança-se uma mistura com umidade da

ordem de 10%, numa relação de 8:1. Caso se reduza a umidade de ambos em 50%, alcança-se a mesma mistura (umidade de cerca de 10%) numa proporção de 2:1.

A seguir são desenvolvidas simulações de carga de altos-fornos e de usinas de sinterização quando se substitui parte da carga metálica por, respectivamente, pelotas e mini-pelotas produzidas para as proporções de 8:1:1 e 3:1:1.

Estas proporções foram definidas a partir dos dados contidos na tabela V.2.

**TABELA V.2**

**Utilização e Proporções Simuladas 8:1:1 e 3:1:1 (PFF:torta da ETEA:carepa)**

UTILIZAÇÃO	PROPORÇÃO (PFF/Carepa/Torta)	CONDIÇÕES
Alto-forno	8:1:1	Proporção utilizada nos ensaios de pelotização, cura e qualidade das pelotas
Alto-forno	3:1:1	Proporção que representa o mínimo de uso de PFF definido em função da umidade final da pelota
Sinterização	8:1:1	Proporção utilizada nos ensaios de pelotização e cura das mini-pelotas
Sinterização	3:1:1	Proporção que representa o mínimo de uso de PFF definido em função da umidade final das mini-pelotas

Os resultados das simulações estão apresentados nas tabelas V-3, V-4, respectivamente para a utilização das pelotas produzidas nos altos-fornos A, B e D nas proporções de 8:1:1 e 3:1:1. Já as tabelas V-5 e V-6 apresentam os resultados das simulações para alimentação das pelotas nas proporções de 8:1:1 e 3:1:1 no forno E, devido à sua maior capacidade de produção.

Tabela V.3

## Proposição 8:1:1 - Carregamento dos altos-fornos A, B e D - Simulação 1

Componentes da Carga	Situação Convencional							Subprodutos					Balanço (*)
	Minério	Sinter	Quartzito	Sucata	Carvão V	Cinza	Total	Torta	Carepa	PFF	Pelota	AF - A, B e D	
Alimentação em t/mês	20.214	30.321	2.000	2.200	32.984	1.320	89.039	105	75	1.440	1.620	89.039	
% Fe	67,0	58,0	0,80	65,0	-	2,0	36,6	37,2	53,3	68,2	65,5	37,8	
% SiO <sub>2</sub>	0,80	5,5	97,5	-	-	15,0	4,47	4,92	-	0,77	1,0	4,42	
% Mn	0,30	0,53	-	-	-	1,0	0,26	0,26	-	0,028	0,04	0,25	
% P	<0,05	0,05	-	-	-	-	0,03	0,076	0,021	0,033	0,035	0,03	
% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,7	1,55	0,40	-	-	3,0	0,74	0,87	0,08	0,183	0,22	0,72	
% CaO	-	9,50	-	-	-	37,0	3,8	15,95	-	0,008	1,04	3,6	
% MgO	-	1,35	-	-	-	1,0	0,015	1,03	<0,02	0,025	0,089	0,45	
% S	-	-	-	-	-	2,0	0,03	0,17	-	0,022	0,030	0,030	
% Pb	-	-	-	-	-	-	-	0,42	-	-	2,7x10 <sup>-2</sup>	4,9x10 <sup>-4</sup>	
% Zn	-	-	-	-	-	-	-	0,04	-	-	2,5x10 <sup>-3</sup>	4,5x10 <sup>-5</sup>	
% Na	-	-	-	-	-	12,0	0,18	0,05	-	-	3,2x10 <sup>-3</sup>	0,18	

(\*) Considerando-se a substituição de parte do sinter pelas pelotas dos subprodutos.

Tabela V.4

## Proposição 3:1:1 - Carregamento dos altos-formos A, B e D - Simulação 2

Componentes da Carga	Situação Convencional							Subprodutos					Balanço (*)
	Minério	Sinter	Quartzito	Sucata	Carvão V	Cinza	Total	Torta	Carepa	PFF	Pelota	AF - A, B e D	
Alimentação em t/mês	20.214	30.321	2.000	2.200	32.984	1.320	89.039	105	75	540	720	89.039	
% Fe	67,0	58,0	0,80	65,0	-	2,0	36,6	37,2	53,3	68,2	62,1	36,6	
% SiO <sub>2</sub>	0,80	5,5	97,5	-	-	15,0	4,47	4,92	-	0,77	1,29	4,43	
% Mn	0,30	0,53	-	-	-	1,0	0,26	0,26	-	0,028	0,059	0,25	
% P	<0,05	0,05	-	-	-	-	0,03	0,076	0,021	0,033	0,038	0,03	
% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,7	1,55	0,40	-	-	3,0	0,74	0,87	0,08	0,183	0,27	0,73	
% CaO	-	9,50	-	-	-	37,0	3,8	15,95	-	0,008	2,33	3,73	
% MgO	-	1,35	-	-	-	1,0	0,015	1,03	<0,02	0,025	0,17	0,47	
% S	-	-	-	-	-	2,0	0,03	0,17	-	0,022	0,04	0,03	
% Pb	-	-	-	-	-	-	-	0,42	-	-	6,1x10 <sup>-2</sup>	4,9x10 <sup>-4</sup>	
% Zn	-	-	-	-	-	-	-	0,04	-	-	5,8x10 <sup>-3</sup>	4,7x10 <sup>-3</sup>	
% Na	-	-	-	-	-	12,0	0,18	0,05	-	-	7,2x10 <sup>-3</sup>	0,17	

(\*) Considerando-se a substituição de parte do sinter pelas pelotas dos subprodutos.

Tabela V.5

## Proposição 8:1:1 - Carregamento no alto-forno E - Simulação 3

Componentes da Carga	Situação Convencional										Subprodutos				Balanco
	Minério	Sinter	Quartzito	Calcário	Pelotas	Coque	Cinzas	Total	Torta	Carepa	PFF	Pelota	AF - E (*)		
Alimentação em t/mês	4.950	24.720	106	42	9.527	11.103	1.096	48.544	105	75	1.440	1.620	48.544		
% Fe	66,7	57,6	0,89	0,25	65,8	-	-	49,05	37,2	53,3	68,2	65,5	49,04		
% SiO <sub>2</sub>	0,65	5,46	96,41	0,91	2,70	-	42,2	4,54	4,92	-	0,77	1,0	3,53		
% Mn	0,73	0,55	0,20	0,48	-	-	-	0,36	0,26	-	0,028	0,04	0,36		
% P	0,059	0,050	0,012	0,054	0,025	-	0,51	0,048	0,076	0,021	0,033	0,035	0,048		
% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,63	1,53	0,76	0,11	0,52	-	26,2	1,54	0,87	0,08	0,183	0,22	1,52		
% CaO	-	9,70	0,52	54,3	-	-	3,88	5,07	15,95	-	0,008	1,04	5,10		
% MgO	-	1,45	0,29	0,90	0,050	-	1,19	0,78	1,03	<0,02	0,025	0,089	0,78		
% S	-	-	0,015	0,030	0,02	-	7,5	0,17	0,17	-	0,022	0,030	0,17		
% Pb	-	-	-	-	-	-	-	-	0,42	-	-	2,7x10 <sup>-2</sup>	9,0x10 <sup>-4</sup>		
% Zn	-	-	-	-	-	-	-	-	0,04	-	-	2,5x10 <sup>-3</sup>	8,3x10 <sup>-3</sup>		
% Na	-	-	-	-	-	-	-	-	0,05	-	-	3,2x10 <sup>-3</sup>	1,0x10 <sup>-4</sup>		

(\*) Considerando-se a substituição de parte das pelotas convencionais pelas pelotas dos subprodutos.

Tabela V.6

## Proposição 3:1:1 - Carregamento no alto-forno E - Simulação 4

Componentes da Carga	Situação Convencional										Subprodutos					Balanco
	Minério	Sinter	Quartzito	Calcário	Pelotas	Coque	Cinzas	Total	Torta	Carepa	PFF	Pelota	AF - E(*)			
Alimentação em t/mês	4.950	24.720	106	42	9.527	11.103	1.096	48.544	105	75	540	720	48.544			
% Fe	66,7	57,6	0,89	0,25	65,8	-	-	49,05	37,2	53,3	68,2	56,7	48,9			
% SiO <sub>2</sub>	0,65	5,46	96,41	0,91	2,70	-	42,2	4,54	4,92	-	0,77	1,3	4,45			
% Mn	0,73	0,55	0,20	0,48	-	-	-	0,36	0,26	-	0,028	0,06	0,36			
% P	0,059	0,050	0,012	0,054	0,025	-	0,51	0,048	0,076	0,021	0,033	0,04	0,048			
% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,63	1,53	0,76	0,11	0,52	-	26,2	1,54	0,87	0,08	0,183	0,27	1,53			
% CaO	-	9,70	0,52	54,3	-	-	3,88	5,07	15,95	-	0,008	2,33	5,10			
% MgO	-	1,45	0,29	0,90	0,050	-	1,19	0,78	1,03	<0,02	0,025	0,17	0,78			
% S	-	-	0,015	0,030	0,02	-	7,5	0,17	0,17	-	0,022	0,04	0,17			
% Pb	-	-	-	-	-	-	-	-	0,42	-	-	6,1x10 <sup>-2</sup>	9,0x10 <sup>-4</sup>			
% Zn	-	-	-	-	-	-	-	-	0,04	-	-	5,8x10 <sup>-3</sup>	8,6x10 <sup>-3</sup>			
% Na	-	-	-	-	-	-	-	-	0,05	-	-	7,2x10 <sup>-3</sup>	1,0x10 <sup>-4</sup>			

(\*) Considerando-se a substituição de parte das pelotas convencionais pelas pelotas dos subprodutos.

As tabelas V-7 e V-8 apresentam as simulações, considerando-se a alimentação das mini-pelotas produzidas na usina de sinterização, respectivamente, para as proporções 8:1:1 e 3:1:1.

Observa-se que o balanço total do carregamento dos altos-fornos e da planta de sinterização, respectivamente, após a adição da carga de pelotas e mini-pelotas, não se altera, ou seja:

- a adição de 100% dos subprodutos na proporção de 8:1:1 no alto-forno E, sem haver a substituição de parte das cargas convencionais, implicaria num acréscimo de 3%;
- a adição de 100% dos subprodutos na proporção de 3:1:1 nos altos-fornos A, B e D, sem a substituição de parte das cargas convencionais, implicaria num acréscimo de 1,4%;
- a adição de 100% dos subprodutos na proporção de 3:1:1 na planta de sinterização, sem substituição de parte das cargas convencionais, implicaria num acréscimo de 0,4% e de 0,9% para a proporção de 8:1:1.

Alguns estudos deverão ser desenvolvidos, com relação aos produtos (aço ou sinter) devidos à presença dos componentes indesejáveis (Na, Cl, Zn e Pb) nos processos siderúrgicos.

#### **5.4 - Avaliação Preliminar dos Custos e Benefícios**

Baseando-se nos estudos desenvolvidos em escala de laboratório, as estimativas dos custos e benefícios com a implantação da Unidade de Reciclagem dos Subprodutos: torta da ETEA e carepa são apresentadas e discutidas a seguir.

A Unidade de Reciclagem dos Subprodutos será composta pelas seguintes instalações básicas, conforme mostra a figura 5.1, considerando-se a possibilidade para a produção de três tipos de produtos, implicando no aumento do valor agregado:

Tabela V.7

## Proposição 8:1:1 - Carregamento na planta de sinterização - Simulação 5

Carga	Situação Convencional											Subprodutos		Balança
	Sinter	Calcaário	Minério Manganês	Cal	Retorno Interno	Coque	Cinzas Coque	Carvão vegetal	Cinzas C. vegetal	Duníto	Retorno A F	Total	Mini-Pelota	
t/mês	59.233	11.979	620	138	34.599	1.491	184	54.940	7.000	3.163	12.000	173.347	1.620	173.347
% Fe	65,8	-	33,8	-	-	-	-	-	-	6,62	54,1	26,5	58,5	27,0
% SiO <sub>2</sub>	3,53	1,4	12,5	1,05	-	-	36,6	-	36,6	37,1	5,9	3,95	4,5	3,99
% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,02	-	1,70	-	-	-	17,7	-	17,7	4,3	2,5	1,34	1,1	1,34
% CaO	9,00	54,9	-	92,3	-	-	10,3	-	-	4,5	5,6	7,42	0,65	7,43
% MgO	-	-	-	3,30	-	-	-	-	-	29,7	1,1	0,62	0,25	0,62
% Mn	0,29	-	21,2	-	-	-	-	-	-	-	0,7	0,22	0,097	0,053
% TiO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,16	1,4x10 <sup>-3</sup>
% P	0,035	-	0,12	-	-	-	-	-	-	-	0,023	0,014	0,035	2,3x10 <sup>-3</sup>
% S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,005	4,7x10 <sup>-5</sup>
% Cl	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,002	1,9x10 <sup>-5</sup>
Pb (ppm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	62	0,58
Zn (ppm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	68	0,64
Na (ppm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	660	6,16
PF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,10	9,3x10 <sup>-4</sup>

(\*) Considerando-se a substituição de parte do retorno convencionais pelas mini-pelotas dos subprodutos.

Tabela V.8

## Proposição 3:1:1 - Carregamento na planta de sinterização - Simulação 6

Carga	Situação Convencional											Subprodutos		Balanco
	Sinter	Calcário	Mimério Manganés	Cal	Retorno Interno	Coque	Cinzas Coque	Carvão vegetal	Cinzas C. vegetal	Dunito	Retorno A F	Total	Mini-Pelota	
t/mês	59.233	11.979	620	138	34.599	1.491	184	54.940	7.000	3.163	12.000	173.347	720	173.347
% Fe	65,8	-	33,8	-	-	-	-	-	-	6,62	54,1	26,5	58,5	26,7
% SiO <sub>2</sub>	3,53	1,4	12,5	1,05	-	-	36,6	-	36,6	37,1	5,9	3,95	4,5	3,86
% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,02	-	1,70	-	-	-	17,7	-	17,7	4,3	2,5	1,34	1,1	1,34
% CaO	9,00	54,9	-	92,3	-	-	10,3	-	-	4,5	5,6	7,42	0,65	7,42
% MgO	-	-	-	3,30	-	-	-	-	-	29,7	1,1	0,62	0,25	0,62
% Mn	0,29	-	21,2	-	-	-	-	-	-	-	0,7	0,22	0,097	0,22
% TiO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,16	6,7x10 <sup>-4</sup>
% P	0,035	-	0,12	-	-	-	-	-	-	-	0,023	0,014	0,035	0,014
% S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,005	2,1x10 <sup>-5</sup>
% Cl	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,002	8x10 <sup>-6</sup>
Pb (ppm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	62	0,25
Zn (ppm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	68	0,28
Na (ppm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	660	2,74
PF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,10	4,1x10 <sup>-4</sup>

(\*) Considerando-se a substituição de parte do retorno pelas mini-pelotas produzidas a partir dos subprodutos.

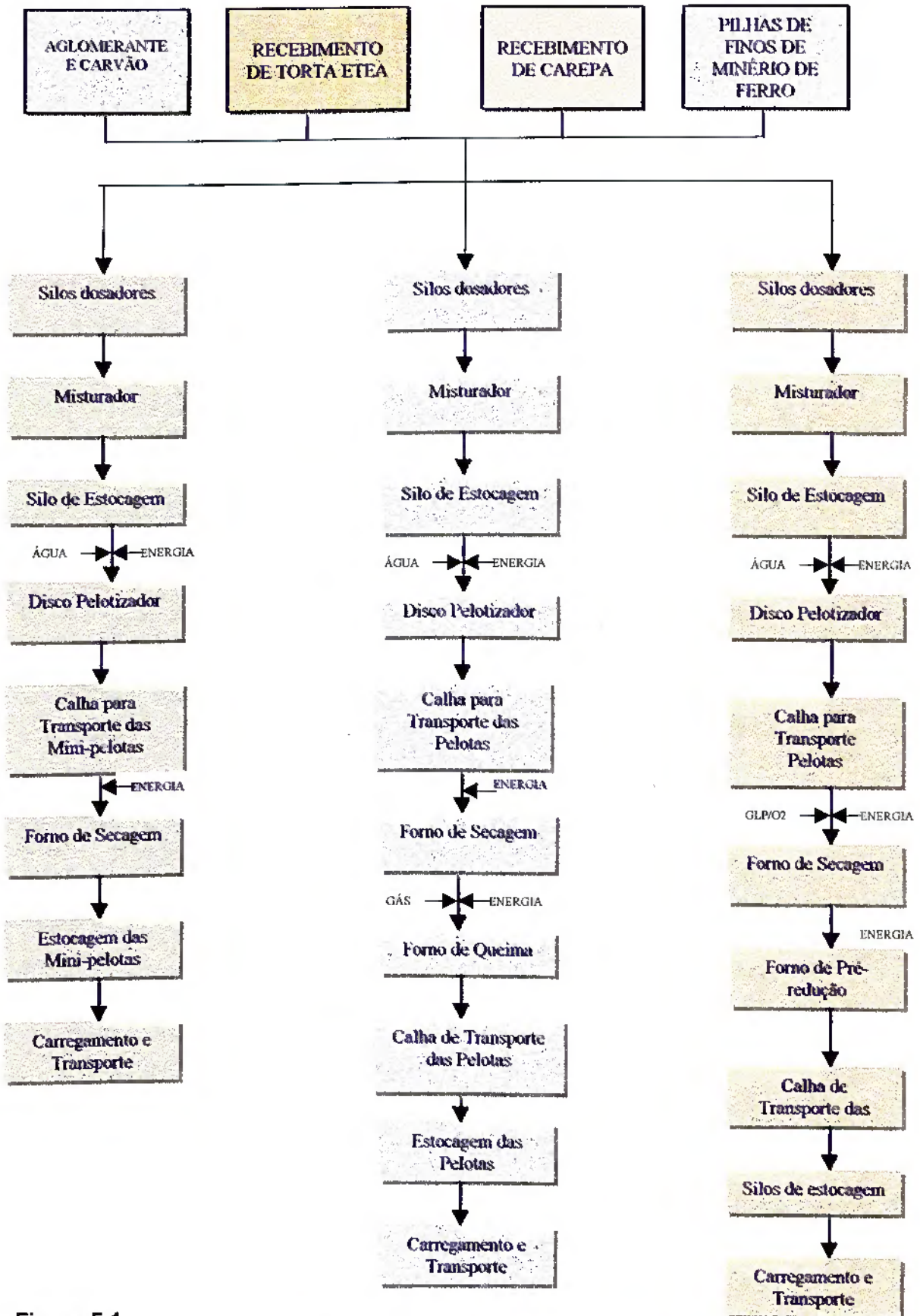


Figura 5.1

Fluxograma da planta de aglomeração dos subprodutos por pelotização

- produção de pelotas para usos em altos-fornos: dosador dos materiais, misturador/homogeneizador, disco pelletizador, forno de secagem e de cura das pelotas;
- produção de mini-pelotas para usos em sinterização: dosador dos materiais, misturador/homogeneizador, disco pelletizador e forno de secagem das mini-pelotas;
- produção de pó de ferro: dosador dos materiais, misturador/homogeneizador, disco pelletizador, forno de secagem e forno de redução.

Os materiais serão carregados através de equipamentos móveis (pás-carregadeiras) e alimentados em tremonhas dosadoras específicas para cada tipo de material. Após a pesagem, os materiais serão enviados para o misturador contendo sistema de pás.

Através de um transportador helicoidal, a mistura seria enviada e alimentada no disco pelletizador. As pelotas ou mini-pelotas produzidas serão enviadas para um sistema de peneiras, onde as frações mais finas (<10 mm para as pelotas e <4 mm para as mini-pelotas) retornarão ao processo de pelletização e as frações de pelotas entre 10 e 12 mm serão alimentadas no forno de secagem do tipo de grelhas, seguindo para o forno rotativo para a cura, e as mini-pelotas entre 4 e 6 mm serão alimentadas no forno de secagem para o endurecimento das mesmas.

Com o objetivo de aumentar o valor agregado aos produtos, estes poderão ser pré-reduzidos, implicando no acréscimo de R\$70,00/t (tonelada de pelota) para R\$120,00/t (valor mínimo).

Os custos estimados de investimento para uma planta de aglomeração por pelletização visando a produção de pelota convencional e pré-reduzida, com capacidade para 6.000 t/mês, são apresentados na tabela VII.1.

Os custos de operação estão apresentados na tabela VII.2, considerando-se uma quantidade maior dos subprodutos de torta da ETEA e de carepa, se comparados com as gerações apresentadas no documento, tendo em vista a existência de outros geradores dos mesmos subprodutos.

Tabela VII.1

Estimativas dos investimento da planta de pelotização e da pré-redução dos subprodutos

Itens	Quantidades	Preço unitário (em R\$)	Preço total (em R\$)
Área fechada para estocagem de materiais	30 m <sup>2</sup>	250,00	32.500,00
Área aberta para estocagem dos materiais	1.200 m <sup>2</sup>	100,00	120.000,00
Prédio administrativo e laboratório físico e químico	70 m <sup>2</sup>	500,00	35.000,00
Subestação (150 kVA)	01	60.000,00	60.000,00
Instalações do laboratório	01	40.000,00	40.000,00
Silo para a torta da ETEA	10	5.000,00	50.000,00
Silo para minério	01	25.000,00	25.000,00
Silo para carvão	01	25.000,00	25.000,00
Silo para aglomerante	01	25.000,00	25.000,00
Silo pulmão	01	10.000,00	10.000,00
Silo de estocagem	01	25.000,00	25.000,00
Transportador de correia	02	15.000,00	30.000,00
Misturador/homogeneizador	02	50.000,00	50.000,00
Disco pelotizador	01	30.000,00	30.000,00
Calha vibratória	02	5.000,00	5.000,00
Forno de secagem	01	130.000,00	130.000,00
Forno de pré-redução	01	245.000,00	245.000,00
Separador magnético	01	15.000,00	15.000,00
Elevador tipo canecas	01	15.000,00	15.000,00
Sistema de tratamento das emissões	01	20.000,00	20.000,00
Impostos	-	172.500,00	172.500,00
Montagem dos equipamentos	-	50.000,00	50.000,00
Reservas (15% do total)	-	-	181.500,00
<b>TOTAL</b>			<b>1.391.500,00</b>

Tabela VII.2

## Custos de operação da planta de pelotas pré-reduzidas

Itens	Quantidades	Preço unitário (em R\$)	Preço total (em R\$)
<b>INSUMOS</b>			
Manuseio da torta da ETEA	1.300 t/mês	20,00/t	26.000,00
Aquisição e manuseio dos finos de minério de ferro	6.500 t/mês	22,00/t	143.000,00
Aquisição e manuseio de bentonita	78 t/mês	150,00/t	11.700,00
Aquisição e manuseio de carvão	2.730 t/mês	40,00/t	109.200,00
Gás oxigênio	270.000 Nm <sup>3</sup> /mês	0,20/Nm <sup>3</sup>	54.000,00
Gás GLP	138.000 kg/mês	0,51/kg	70.780,00
Energia elétrica	170 MW/mês	56,00/MW	9.520,00
<b>MÃO-DE-OBRA</b>			
Engenheiro: 01 Técnico: 01 Operadores: 720 homens/mês (5 turnos) Administrativos: 04	-	-	40.000,00
Despesas administrativas	-	-	11.235,00
<b>AMORTIZAÇÃO</b>			
Considerando um investimento da ordem de R\$ 1.500.000,00, o prazo de amortização de 10 anos, a taxa de juros de 20%.	-	-	21.520,71 amortização mensal
<b>ENCARGOS TRIBUTARIOS</b>			
Sobre o faturado: ICMS, IPI, PIS, COFINS,	-	-	191.526,97
Sobre o lucro líquido: Imposto de Renda, Contribuição Social	-	-	15.701,43
<b>CUSTO TOTAL DE PRODUÇÃO</b>			<b>704.184,31</b>
Receitas (Recepção de resíduos)	1.300 t/mês	35,00/t	45.500,00
Produção de pelotas pré-reduzidas	6.000 t/mês	120,00/t	720.000,00
<b>RECEITAS</b>			<b>765.500,00</b>
<b>LUCRO LÍQUIDO MENSAL</b>			<b>61.315,69</b>

Os resultados indicam que os estudos e a implantação de uma Unidade de Reciclagem dos Subprodutos possui atrativos financeiros, principalmente quando se sabe que os custos de disposição da torta da ETEA em células especiais é da ordem de R\$60,00/t a R\$100,00/t além da criação do passivo ambiental.

## **6 - CONCLUSÕES**

### **6.1 - Metodologia Proposta**

O procedimento geral para caracterização tecnológica de resíduos compreende o mesmo procedimento para caracterização detalhada de um corpo mineral, tanto para um planejamento de lavra ou para elaboração de um projeto de processo de concentração/tratamento de minérios.

De certa forma, existe um paralelo bastante grande entre esta atividade de reciclagem de resíduos e a atividade de prospecção geológica, pois os resíduos industriais podem, sem dúvida, ser encarados como "minérios artificiais" e sua "exploração" (reciclagem) passa por etapas de avaliação, desenvolvimento, processamento e comercialização na mesma ordem e com características muito similares às etapas envolvidas nos projetos de mineração.

Os resultados obtidos na presente pesquisa indicam que as metodologias aplicáveis ao tratamento de minérios e de desenvolvimento tecnológico são perfeitamente adequadas para o tratamento de resíduos industriais, estejam na forma sólida, semi-sólida ou líquida. Estes resíduos devem, portanto, ser submetidos às 8 (oito) etapas descritas no item 4.2 - Metodologia:

1ª etapa: Identificação do resíduo sólido industrial.

2ª etapa: Caracterização do processo gerador do resíduo.

3ª etapa: Planejamento da amostragem dos resíduos.

4ª etapa: Caracterização dos resíduos sólidos.

5ª etapa: Identificação das causas da geração dos resíduos, buscando técnicas de redução do volume gerado.

6ª etapa: Identificação da rota tecnológica para o sistema de tratamento do resíduo, a partir do seu potencial de reciclagem.

7ª Etapa: Avaliação do potencial de reciclagem - Desenvolvimento de Estudos.

8ª Etapa: Análise do custo e benefício do processo de tratamento.

## 6.2 - Avaliação dos Resultados dos Estudos Desenvolvidos

### ✓ *Testes de pelotização*

O desenvolvimento do processo de pelotização para os subprodutos (torta da ETEA e carepa) misturados com finos de minério de ferro mostrou-se tecnicamente viável para a proporção de 8:1:1 (PFF:torta da ETEA:carepa) com umidade final da mistura em 7%, adição de 1% de bentonita, inclinação do disco em 45°, velocidade do disco em 21 rpm, alimentação de água na ordem de 50 mL/min, tempo de pelotização em 10 min e umidade final das pelotas em 11%.

Os resultados dos ensaios de qualidade realizados para as pelotas, compressão e de tamboramento, indicaram que as mesmas apresentam características físicas adequadas para utilização em altos-fornos. Contudo, melhores condições de queima deverão ser estudadas para melhorar os resultados do controle metalúrgico, especificamente a redutibilidade,

As mini-pelotas produzidas para alimentação nas plantas de sinterização, utilizando-se tanto a bentonita quanto o silicato de sódio como agentes aglomerantes, apresentaram características desejáveis que possibilitarão a mínima geração de pós durante o seu manuseio e nem a qualidade do sinter.

### ✓ *Estudos Simulatórios*

Uma geração pelotas a partir de 105 t/mês de torta da ETEA e 75 t/mês de carepa, representa um acréscimo da ordem de 1 a 2% da carga total dos altos-fornos estudados, sem que haja a substituição de parte das cargas convencionais, podendo-se constatar que esta pequena adição na carga não alteraria o funcionamento e a operacionalização dos altos-fornos.

Além disso, as características físicas, químicas e metalúrgicas do aço ou sinter não seriam alteradas com a carga de pelotas ou mini-pelotas produzidas a partir dos subprodutos torta da ETEA e carepa.

✓ ***Avaliação dos custos e dos benefícios***

O fato da substituição do termo resíduos por subprodutos pode ser melhor justificado com os resultados da avaliação dos custos e benefícios da implantação da Unidade de Reciclagem da Torta da ETEA e da Carepa.

Apesar de ser uma avaliação estimativa preliminar, baseando-se em estudos em escala de laboratório, pode-se constatar que os materiais, até então, incluídos somente como despesas de uma empresa, apresentam uma receita significativa da ordem de R\$60.000,00/mês, além dos benefícios sociais com a criação de empregos, dos ganhos ambientais com a minimização dos impactos e dos passivos ambientais deles derivados.

## 7 - CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS AO CONHECIMENTO

A reciclagem não é nova. Desde da década de 1930, já havia a comercialização de sucatas metálicas.

A questão que se coloca é: "qual a condição ótima para o estabelecimento de uma reciclagem"? Segundo o trabalho "*Social Evaluation of Metals Use and Recycling Schemes*"<sup>(52)</sup>, são identificadas as seguintes condições gerais para o estabelecimento de uma unidade de reciclagem:

- que haja disponibilidade de grandes quantidades do resíduo específico;
- que o resíduo tenha características úteis;
- que exista uma tecnologia disponível técnica e economicamente;
- que haja demanda para o produto resultante da unidade de reciclagem;
- que os custos de utilização dos produtos reciclados sejam menores que os dos produtos 'convencionais'.

Dentro deste contexto, uma contribuição original ao conhecimento é a sugestão para a criação de uma disciplina integrante dos cursos de Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas com o tema "Tratamento de Novos Subprodutos". Os objetivos consistem em aplicar e complementar os conhecimentos adquiridos nas diversas disciplinas existentes nos cursos, tais como: tratamento de minérios, pesquisa mineral, operações unitárias, termodinâmica e físico-química metalúrgica, dentre outras, tomando como matérias-primas os resíduos, podendo chamá-los de subprodutos, em substituição aos materiais convencionalmente estudados.

Neste caso, os ganhos podem estar relacionados aos seguintes aspectos:

- conscientização e treinamento do corpo discente, sob os pontos de vista ambiental, econômico e social;
- aprimorar o aprendizado do corpo discente na identificação e no desenvolvimento de metodologias e de equipamentos de controle e de reciclagem de resíduos industriais;
- aprimorar a interação da empresa - escola, através de estudos de reciclagem de resíduos.

## 8 - RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS

A relevância dos resultados será abordada sob os aspectos ambientais, sociais e econômicos, conforme apresenta a Agenda 21<sup>(5)</sup>, que constitui um plano de ação para alcançar o desenvolvimento sustentável a médio e longo prazos através de ações em nível global, com objetivos, atividades, instrumentos e necessidades de recursos humanos e institucionais.

A questão de resíduos sólidos na Agenda 21 é abordada em diversos capítulos, desde os problemas de disposição de resíduos sólidos municipais, havendo a necessidade de discutir o modelo de desenvolvimento, padrões de consumo, saúde, saneamento básico, conscientização e educação, cidadania, legislação, parcerias e recursos financeiros, até as questões dos resíduos sólidos industriais.

No capítulo 20 da Agenda 21 é destacada sobre a ausência de controle de resíduos sólidos industriais perigosos ou não perigosos. O manuseio e a destinação final inadequados criam problemas a longo prazo, envolvendo altos custos ambientais e comprometendo a qualidade da atmosfera, dos recursos hídricos e terrestres, com sérias implicações na saúde e na produtividade humana. Também, é ressaltada sobre a necessidade de incentivar a produção com tecnologias limpas, reciclagem, substituição de materiais perigosos e transferência de tecnologias ambientalmente sustentáveis.

A existência dos problemas com resíduos sólidos é resultante de três fatores básicos: a carência de profissionais capacitados para a grande realidade do problema, a inexistência de linhas de financiamento específicas, disponibilizadas de forma constante e com assessoria técnica adequada, e a estranha falta de decisão por parte de líderes políticos para o encaminhamento de soluções com responsabilidade.

Buscando contribuir para o cumprimento das diretrizes apresentadas na Agenda 21, a presente pesquisa tem como relevância os seguintes aspectos:

- *Aspecto Ambiental:* a possibilidade técnica e econômica para o tratamento de dois resíduos sólidos e, assim, evitar que os mesmos sejam dispostos no solo.

Mesmo que um depósito de resíduos seja operado de forma ambientalmente adequada, o risco de contaminação ao meio ambiente não termina no momento do seu encerramento, sendo necessária a implantação e a execução, por um período não determinado, de um plano de monitoramento das águas superficiais e subterrâneas, das condições físicas (estabilidade, erosão, etc.) e das características químicas dos resíduos que podem ser alteradas com o passar dos tempos.

- *Aspectos sociais:* a implantação do sistema de tratamento dos resíduos torta da ETEA e carepa contribuiria para a geração de novas frentes de trabalho, desde a fase de obras até a fase de operação. Ressalta-se aqui a possibilidade da existência da interação das indústrias com as instituições de pesquisas tecnológicas e educativas. Além disso, existem ganhos ambientais de evitar a disposição destes resíduos no solo, que de certa forma minimiza o risco de contaminação de algum manancial que abastece uma determinada população.
- *Aspectos econômicos:* os ganhos econômicos referem-se à minimização de utilização de bens naturais não renováveis e os custos de disposição de materiais com valor agregado significativo, desde os desnecessários custos de projeto, de implantação, de operação, de manutenção e de encerramento do depósito.

Estes ganhos poderão ser continuados com a busca constante de reciclagem dos resíduos sólidos industriais, com a participação das instituições tecnológicas e das universidades.

## 9 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- A necessidade de buscar soluções adequadas para os resíduos sólidos é uma realidade. A continuidade de estudos e pesquisas nesta linha de resíduos sólidos no curso muito contribuiriam para a sustentabilidade ambiental, além da criação de novas frentes de trabalho para futuros profissionais.
- Buscar a aplicabilidade da metodologia proposta neste estudo, para resolver parte dos problemas existentes com os resíduos sólidos, com o objetivo de estar sempre buscando sua melhoria e seu aprimoramento, uma vez que existem inúmeros tipos de resíduos de diferentes setores industriais.
- Com relação ao estudo de Tratamento da Torta da ETEA e Carepa, apresentado como exemplo da metodologia de Reciclagem de Resíduos, faz-se necessário dar continuidade ao mesmo, através da obtenção de mais resultados a partir dos experimentos laboratoriais. A partir daí, os ensaios de qualidade serão mais representativos e outros parâmetros poderão ser estudados e detalhados, tais como: efeito dos componentes nocivos existentes nos resíduos dos processos metalúrgicos, utilização de outros métodos de aglomeração para os subprodutos, reaproveitamento dos resíduos em processos siderúrgicos sem utilizar métodos de aglomeração, dentre outros.
- Buscar o desenvolvimento dos estudos de reciclagem dos resíduos, torta da ETEA e Carepa em escala semi-industrial, com o objetivo de se produzir pelotas e/ou mini-pelotas em quantidades suficientes para aplicação nos processos siderúrgicos e, assim, certificar sobre os efeitos na qualidade do produtos, avaliar os eventuais impactos sob a qualidade ambiental e das emissões a serem causados e gerados com o reaproveitamento dos subprodutos e detalhar os custos de investimentos e de operação da planta.

## 9 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO, *Nosso futuro comum*, Editora Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro, 1988, 245p.
- (2) FONSECA, D. C., *Projeto de Reciclagem de Resíduos Industriais* Belo Horizonte, Brandt Meio Ambiente/RHAE-CNPq, 1994, 300p.
- (3) LERÍPIO, A. et al., *A emissão zero - A busca da geração de novas oportunidades de negócios a partir de resíduos industriais*. In: SEMINÁRIO RECICLAGEM DE RESÍDUOS, 1997, Espírito Santo. Anais: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, p.1-14.
- (4) AYERS, K. W., Solid and hazardous waste treatment and disposal. In: Ayers, K. W., *Environmental science and technology handbook* Maryland, Government Institutes, Inc., 1994, p.177-208.
- (5) PHILIPPI, Jr. A., Agenda 21 e resíduos sólidos. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, *Resid'99 - Seminário Sobre Resíduos Sólidos*, São Paulo, Editora e Gráfica Ltda., 1999, Palestras, p.15-27.
- (6) THE EARTH WORKS GROUP, *The Recycle's Handbook - Manual de Reciclagem - Coisas simples que você pode fazer*. Tradução Rio de Janeiro: José Olympio Editora, 1995, 163p.
- (7) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Rio de Janeiro  
NBR 10004 - Classificação de resíduos sólidos, 1997, 63p.  
NBR 10005 - Lixiviação de resíduos - Procedimentos, 1987, 2p.  
NBR 10006 - Solubilização de resíduos - Procedimentos, 1987, 4p.  
NBR 10007 - Procedimentos para amostragem de resíduos, 1987, 25p.
- (8) \_\_\_ GAZETA MERCANTIL, São Paulo, 20 de março de 1993.

- (9) \_\_\_\_ JORNAL CEMPRES - Compromisso empresarial para reciclagem, São Paulo, Junho, 1997. Nº 34, p.3-4.
- (10) MANAHAN, S. E., *Environmental Chemistry*, , 5. Ed, Copyright by Lewis Publishers, Inc., Michigan, 1991, 583p.
- (11) ROCCA, A. C. et al., *Resíduos sólidos industriais*, CETESB, 2. edição revisada e ampliada, São Paulo, 1993, 233p.
- (12) NEMEROV, N. L., *Industrial and hazardous waste treatment*, Environmental Engineering Series Van Nostrand, New York, 1991.
- (13) TINOCO, J., *Compostagem de Resíduos Sólidos*, Universidade Federal de Viçosa, Apostila, 1995, 50p.
- (14) CICI - CENTRO DAS INDÚSTRIAS DAS CIDADES INDUSTRIAIS, BOLSA DE RESÍDUOS DO ESTADO DE MINAS GERAIS, *Jornal Informativo*, 1993, 5p.
- (15) CHEHEBE, J. R. et al., Geração e destinação de escórias pela indústria siderúrgica brasileira. In: SEMINÁRIO SOBRE RESÍDUOS SIDERÚRGICOS, 1987, Rio de Janeiro, *Anais: Associação Brasileira de Siderurgia*, p.B3-B38.
- (16) ASSIS, R. M. et al., Algumas questões ligadas ao controle ambiental na siderurgia e suas soluções. In: SEMINÁRIO DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS, 1997, Espírito Santo. *Anais: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais*, p.15-26.
- (17) SILVA, M. G. et al., Reciclagem das escórias siderúrgicas: a importância da parceria tecnológica. In: SEMINÁRIO DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS, 1997, Espírito Santo. *Anais: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais*, p.29-44.

- (18) MARQUES, J. C. e TANGO, C. E. S., Adição de escória ao concreto para economizar cimento. In: SEMINÁRIO DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS PARA REDUÇÃO DE CUSTOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 1994, Belo Horizonte. *Anais: Instituto Pesquisa Tecnológica - CREA/MG - EPUSP - SLU/BH*, p.17-26.
- (19) CHIARATTI, L. et al., Escória de alto-forno COSIPA. In: SEMINÁRIO SOBRE RESÍDUOS SIDERÚRGICOS, 1987, Rio de Janeiro. *Anais: Associação Brasileira de Siderurgia*, p.D3-D8.
- (20) LIMA, G. L.; GONSÁLEZ, J. L. R. e SALATA, R., Exemplo de aplicação do sistema de painéis IPT/IDRC.. In: SEMINÁRIO DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS PARA REDUÇÃO DE CUSTOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 1994, Belo Horizonte. *Anais: Instituto Pesquisa Tecnológica - CREA/MG EPUSP - SLU/BH*, p.27-29.
- (21) MONETTI, E. e PECORARO, G., Viabilidade econômica do sistema de painéis IPT/IDRC. In: SEMINÁRIO DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS PARA REDUÇÃO DE CUSTOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 1994, Belo Horizonte. *Anais: Instituto Pesquisa Tecnológica - CREA/MG - EPUSP - SLU/BH*, p.30-40.
- (22) BERNARDES Jr. C.; FRASSI, R. e ALBOREDA, R., Aspectos ambientais do uso de resíduos da escória de aciaria em encascalhamento de estrada. In: SEMINÁRIO DE RECICLAGEM DE REJEITOS DA INDÚSTRIA MÍNERO-METALÚRGICA, 1992, Ouro Preto, *Anais: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais*, p.119-138.
- (23) JUNQUEIRA, S. A., A experiência da Belgo Mineira na utilização de finos de carvão vegetal. In: SEMINÁRIO SOBRE RESÍDUOS SIDERÚRGICOS, 1987, Rio de Janeiro. *Anais: Associação Brasileira de Siderurgia*, p.H2-H32.

- (24) ROCHA, N. C. e MARTINS, A. A., Recuperação do pó de carvão vegetal resultante de despoejamento. In: RECUPERAÇÃO DE REJEITOS NA INDÚSTRIA METALÚRGICA, 1991, São Paulo, *Anais: Associação Brasileira de Metais*, p.123-136.
- (25) SILVA, J. M. et al., Aglomeração do pó de carvão com resíduos de alcatrão para utilização nas baterias de fornos de coque. In: SEMINÁRIO SOBRE RESÍDUOS SIDERÚRGICOS, 1987, Rio de Janeiro. *Anais: Associação Brasileira de Siderurgia*, p.1.2-18.
- (26) MITKIEWIEZ, A. ; FREITAS, O. e AMARAL, A., Sistema de automatização para adição de resíduo de alcatrão à mistura de carvões da Usiminas, In: SEMINÁRIO DE RECICLAGEM DE REJEITOS DA INDÚSTRIA MÍNERO-METALÚRGICA, 1992, Ouro Preto, *Anais: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais*, p.483-496.
- (27) SOLEDADE, L. E. et al., Introdução de carvão recuperado do nivelamento do Posto de Sepetiba na mistura a coqueificar da CSN. In: RECUPERAÇÃO DE REJEITOS NA INDÚSTRIA METALÚRGICA, 1991, São Paulo, *Anais: Associação Brasileira de Metais*, p.01-17.
- (28) WEPPEMANN, S.; GUDENAU, H. W. e AZEVEDO, F., Combined injection of coal, fine ore and containing recyclings into the blast furnace - a way to an ecological pig iron production. In: INTERNATIONAL SEMINAR ENVIRONMENTAL PROTECTION AND NEW TECHNOLOGIES IN THE IRON AND STEEL INDUSTRY, 1995, UFMG, DESA/GTZ, Univ. Técnica de Aachen - Alemanha, Belo Horizonte, p.07-13.
- (29) BRAGA, R. N. B., Aproveitamento de finos de carvão vegetal para injeção pelas ventaneiras de alto-forno da ACESITA. In: SEMINÁRIO SOBRE RESÍDUOS SIDERÚRGICOS, 1987, Rio de Janeiro. *Anais: Associação Brasileira de Siderurgia*, p.G1-G23.

- (30) GALDEANO, O . R . et al., A experiência da CSN na reciclagem de resíduos sólidos nas sinterizações. In: XXV SEMINÁRIO REDUÇÃO E MATÉRIAS-PRIMAS SIDERÚRGICAS, 1994, Volta Redonda. *Anais: Associação Brasileira de Metalurgia*, p.130-133.
- (31) VIDAL, J. A . et al., Aproveitamento de resíduos industriais na sinterização - Perspectivas futuras na CST.. In: SEMINÁRIO SOBRE RESÍDUOS SIDERÚRGICOS, 1987, Rio de Janeiro. *Anais: Associação Brasileira de Siderurgia*, p.L1-L16.
- (32) MARTINS, P. A . et al., Utilização de pó de coletor de alto-forno nas sinterizações da CSN. In: SEMINÁRIO DE RECICLAGEM DE REJEITOS DA INDÚSTRIA MÍNERO-METALÚRGICA, 1992, Ouro Preto, *Anais: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais*, p.139-151.
- (33) PEREIRA, E. A. C., *Emprego de rejeitos siderúrgicos pelletizados na sinterização de minério de ferro*, Belo Horizonte, Escola de Engenharia, 1982, 118p., (Dissertação de Mestrado Engenharia Metalúrgica).
- (34) PUBLICAÇÃO INTERNA - Siderúrgica Barra Mansa - Recuperação de pós residuais por pelletização em usinas siderúrgicas, 1993.
- (35) MONTOVANI, M. C.; TAKANO, C.; NASCIMENTO, R. C. Jr., Caracterização do resíduo de aciaria elétrica e sua aplicação na forma de pelotas auto-redutoras. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO, Santos, 1996, *Anais: Associação Brasileira de Metais*, p. 433-448.
- (36) NASCIMENTO Jr. R. C., et al., O inchamento de pelotas auto-redutoras na reciclagem de resíduos siderúrgicos., In: SEMINÁRIO DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS, 1997, Espírito Santo. *Anais: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais*, p.67-85.

- (37) INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE COMMITTEE ON ENVIRONMENTAL AFFAIRS, 1987, Brussels, *The management of steel industry by-products and waste*, Chapter 4 - Ironmaking dust and sludges, p.4/41-4/53.
- (38) INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE COMMITTEE ON ENVIRONMENTAL AFFAIRS, 1987, Brussels, *The management of steel industry by-products and waste*, Chapter 5 - Steelmaking dust and sludges, p.5/55-5/59.
- (39) CORRÊA, A .M. M. B. A. et al., Tratamentos dos efluentes dos altos-fornos 1 e 2, forno elétrico de redução e efluentes de decapagem. In: RECUPERAÇÃO DE REJEITOS NA INDÚSTRIA METALÚRGICA, 1991, São Paulo, *Anais: Associação Brasileira de Metais*, p.79-98.
- (40) BENTES, M. A . G. et al., Estudo da viabilidade técnica de concentração da lama de aciaria, visando o seu reaproveitamento no convertedor LD como equivalente a sucata. In: SEMINÁRIO DE RECICLAGEM DE REJEITOS DA INDÚSTRIA MÍNERO-METALÚRGICA, 1992, Ouro Preto, *Anais: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais*, p.139-151.
- (41) BRINCK, V. et al., Desenvolvimento e implantação, em escala semi-aciaria industrial, de processo de concentração por separação magnética da lama de aciaria. In: SEMINÁRIO DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS, 1997, Espírito Santo. *Anais: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais*, p.133-144.
- (42) BRANT, A. C. F. et al., Programa de reciclagem de resíduos nas fábricas da alumínio primário da ALCAN Alumínio do Brasil S/A In: SEMINÁRIO DE RECICLAGEM DE REJEITOS DA INDÚSTRIA MÍNERO-METALÚRGICA, 1992, Ouro Preto, *Anais: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais*, p.227-252.

- (43) DUTRA, A. J. B.; GETROUW, M. A.; e FONSECA, M. V., Tratamento de lama vermelha para produção de vítreo-cerâmica. In: SEMINÁRIO DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS, 1997, Espírito Santo. *Anais: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais*, p.113-132.
- (44) XVII INTERNATIONAL MINERAL CONGRESS, 1991, Dresden, FRG *Recovery of metals and non-ferrous metal from scrap, Municipal Solid Waste and other secondary material*, volume VII.
- (45) GAZETA MERCANTIL, maio de 1993.
- (46) TENÓRIO, J. A. S., *Aspectos fundamentais e tecnológicos do processo de reciclagem de latas de alumínio*, Tese de Livre-Docência, EPUSP, São Paulo, 1996, 116p.
- (47) CHAVES, A. P. e FUJIMURA, F., Utilização de barragens de rejeitos na indústria minero-metalúrgica. In: RECUPERAÇÃO DE REJEITOS NA INDÚSTRIA METALÚRGICA, 1991, São Paulo, *Anais: Associação Brasileira de Metais*, p.153-172.
- (48) NASCIMENTO, Jr. e CAPOCCHI, J. D. T., Pelotização de finos de minério de manganês. In: SEMINÁRIO DE RECICLAGEM DE REJEITOS DA INDÚSTRIA MÍNERO-METALÚRGICA, 1992, Ouro Preto, *Anais: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais*, p.353-394.
- (49) CHAVES, A. P., Pelotização de finos de calcário. In: SEMINÁRIO DE RECICLAGEM DE REJEITOS DA INDÚSTRIA MÍNERO-METALÚRGICA, 1992, Ouro Preto, *Anais: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais*, p.469-482.
- (50) MEYER, K., *Pelletizing of iron ores*, 1ª edição, Düsseldorf, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1980, 302p.
- (51) BALL, D. F.; DARTNELL, D. J. e GRIEVE, A., *Agglomeration of iron ores*, 1ª edição, Heinemann Educational Books Limited, London, 1973, 405p.
- (52) REINFELD, N. V., *Sistemas de Reciclagem Comunitária - Do Projeto à Administração*, 1ª edição, Makron Books, São Paulo, 1994, 285p.

## **10 - DADOS BIOGRÁFICOS DO AUTOR**

Dinalva Celeste Fonseca nasceu em 26 de abril de 1965 em Mariana, Minas Gerais, filha de Emílio Fonseca Oliveira e Elza Silveira Fonseca. Graduou-se em Engenharia de Minas na UFOP em setembro de 1989. Concluiu o Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas na UFMG em novembro de 1992 na área de concentração Tecnologia Mineral. A partir desta data, ingressou na empresa BRANDT MEIO AMBIENTE, atuando como consultora de assuntos ambientais para as empresas de diversos setores industriais, sendo priorizada a questão de Gestão de Resíduos Sólidos Industriais. Atualmente, vem trabalhando como consultora autônoma para diversas empresas de consultoria na área ambiental.