

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-
PPGEM

Emprego do Processamento Mecânico na Reciclagem de Sucatas de Placas de
Circuito Impresso

Hugo Marcelo Veit

Dissertação para obtenção do título de Mestre
em Engenharia

Porto Alegre

2001

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-PPGEM

Emprego do Processamento Mecânico na Reciclagem de Sucatas de Placas de
Circuito Impresso

Hugo Marcelo Veit
Engenheiro Metalúrgico

Trabalho realizado no Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Ciência dos Materiais

Porto Alegre

2001

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração: Ciência dos Materiais, e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dra. Andréa Moura Bernardes

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Hoffmann Sampaio	PPGEM / UFRGS
Prof. Dra. Jane Zoppas Ferreira	PPGEM / UFRGS
Prof. Dra. Keiko Wada	PPGEQ / UFRGS

Prof. Dr. Jair Koppe
Coordenador do PPGEM

AGRADECIMENTOS

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

A professora Dr^a Andréa Moura Bernardes pelo estímulo, dedicação e esforço pessoal proporcionado.

A professora Dr^a Jane Zoppas Ferreira pelas valiosas contribuições.

A Carolina de Castro Pereira pela sua dedicação a este trabalho, tornando-o possível.

A Luciana Farias Hörlle e Anderson Paulo Salami por todo o trabalho realizado.

A professora Dr^a Deyse Carpenter pela ajuda nas correções.

As colegas e amigas Paulete Trentin, Célia Malfatti e Maura da Rosa.

As funcionárias Ivone Dadalt, Elis Regina Beltrame e Virgínia Dihl.

Ao Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) pelo apóio em equipamento

Ao Laboratório de Cerâmicos (LACER) e ao Núcleo de Design e Seleção de Materiais do LACOR pela ajuda nas fotos.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

A todos os colegas do LACOR e professores do PPGEM que de uma forma ou de outra colaboraram para a realização deste trabalho.

LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABELAS.....	IX
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	XI
RESUMO.....	XIII
ABSTRACT.....	XIV
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	2
2.1 REUSO, RECUPERAÇÃO E RECICLAGEM	2
2.2 RECUPERAÇÃO E RECICLAGEM DE MATERIAIS METÁLICOS	3
2.3 PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO	9
2.4 MÉTODOS DE PROCESSAMENTO	12
2.4.1 <i>pirometalurgia</i>	13
2.4.2 <i>hidrometalurgia</i>	14
2.4.3 <i>biotecnologia</i>	15
2.4.4 <i>eletrometalurgia</i>	16
2.4.5 <i>processos mecânicos</i>	18
2.5 PROCESSAMENTO MECÂNICO	18
2.5.1 <i>cominuição</i>	18
2.5.2 <i>classificação</i>	19
2.5.3 <i>separação gravimétrica</i>	20
2.5.4 <i>separação magnética</i>	37
2.5.5 <i>separação a base de propriedades elétricas</i>	40
2.6 CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS E SUCATAS	42
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
3.1 MATERIAIS	45
3.1.1 <i>placas de circuito impresso</i>	45
3.1.2 <i>soluções</i>	47
3.1.3 <i>equipamentos</i>	50

3.2 MÉTODOS	51
3.2.1 cominuição	53
3.2.2 classificação granulométrica	54
3.2.3 separação por densidade.....	55
3.2.4 lixiviação	57
3.2.5 análise química	58
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59
4.1 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	59
4.2 COMINUIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA	61
4.2.1 placas de circuito impresso (pci)	65
4.2.2 componentes eletrônicos (ce)	67
4.2.3 substrato (sp).....	69
4.2.4 concentração de metais em função da granulometria.....	71
4.3 SEPARAÇÃO POR DENSIDADE	72
4.3.1 separação por densidade para placas de circuito impresso (pci).....	73
4.3.2 separação por densidade para componentes eletrônicos (ce).....	75
4.3.3 separação por densidade para substrato (sp)	78
4.3.4 concentração de metais em função da densidade	80
4.4 LIXIVIAÇÃO.....	82
4.4.1 lixiviação de placa de circuito impresso (pci).....	83
4.4.2 lixiviação de componentes eletrônicos (ce).....	84
4.4.3 lixiviação de substrato (sp)	85
5 CONCLUSÕES.....	87
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	88
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89

LISTA DE FIGURAS:

<i>Fig. 1 – Esquema de algumas possibilidades de processamento de sucatas de placas de circuito impresso⁽³⁾.</i>	12
<i>Fig. 2 – Separador estático cônico com descarga tipo air lift⁽⁶²⁾.</i>	28
<i>Fig. 3 - Ciclone típico⁽⁶²⁾.</i>	29
<i>Fig. 4 - Separador Dyna-Whirlpool⁽⁶²⁾.</i>	30
<i>Fig. 5 – Water-only-cyclone⁽⁶²⁾.</i>	31
<i>Fig. 6 - Jigue Batac de grosseiros⁽⁶²⁾.</i>	33
<i>Fig. 7 - Jigue de finos⁽⁶²⁾.</i>	34
<i>Fig. 8 – Mesa concentradora típica com riffles⁽⁶²⁾.</i>	36
<i>Fig. 9 - Fluxos secundários dentro de uma espiral⁽⁶²⁾.</i>	37
<i>Fig. 10 – Separação de materiais por indução de condutividade⁽²⁴⁾.</i>	41
<i>Fig. 11 – Placa de Circuito Impresso no estado original.</i>	46
<i>Fig. 12 – Fluxograma das etapas do processo.</i>	52
<i>Fig. 13 – Moinho de Facas marca Rone</i>	53
<i>Fig. 14 – Moinho de Facas marca Marconi</i>	54
<i>Fig. 15 – Conjunto de Peneiras marca Retsch</i>	55
<i>Fig. 16 – Funil usado para Separação por Densidade.</i>	56
<i>Fig. 17 – Agitador de Wagner para Ensaio de Lixiviação marca Marconi.</i>	58
<i>Fig. 18 – Resultado da cominuição no moinho marca Rone para PCI.</i>	61
<i>Fig. 19 – Resultado da cominuição da fração 4 (> 1mm) no moinho Marconi para PCI.</i>	63
<i>Fig. 20 – Resultado da cominuição na fração 4 (> 1mm) no moinho Marconi para CE.</i>	63
<i>Fig. 21 – Resultado da cominuição na fração 4 (> 1mm) no moinho Marconi para SP.</i>	64
<i>Fig. 22 – Percentagem de metal e não-metal nas frações de PCI separadas granulométricamente após moagem em moinho marca Marconi.</i>	65

<i>Fig. 23 – Percentagem de Cobre nas frações de PCI após separação granulométrica.</i>	<i>67</i>
<i>Fig. 24 – Percentagem de metal e não-metal nas frações de CE separadas granulométricamente após moagem em moinho marca Marconi.</i>	<i>68</i>
<i>Fig. 25 – Percentagem de Cobre nas frações de CE após separação granulométrica.</i>	<i>69</i>
<i>Fig. 26 – Percentagem de metal e não-metal nas frações de SP separadas granulométricamente após moagem em moinho marca Marconi.</i>	<i>70</i>
<i>Fig. 27 – Percentagem de Cobre nas frações de SP após separação granulométrica.</i>	<i>71</i>
<i>Fig. 28 – Percentagem de material que afunda e que flutua das frações de PCI em contato com TBE (com densidade = 2,5 g.cm⁻³) durante 2 horas.</i>	<i>73</i>
<i>Fig. 29 – Percentagem de metal e não-metal das frações de PCI que afundaram em contato com TBE.</i>	<i>74</i>
<i>Fig. 30 – Percentagem de Cobre nas frações pesadas de PCI após separação por densidade.</i>	<i>75</i>
<i>Fig. 31 – Percentagem de material que afunda e que flutua das frações de CE em contato com TBE (com densidade = 2,5 g.cm⁻³) durante 2 horas.</i>	<i>76</i>
<i>Fig. 32 – Percentagem de metal e não-metal das frações de CE que afundaram.</i>	<i>76</i>
<i>Fig. 33 – Percentagem de Cobre nas frações pesadas de CE após separação por densidade.</i>	<i>77</i>
<i>Fig. 34 – Percentagem de material que afunda e que flutua das frações de SP em contato com TBE (com densidade = 2,5 g.cm⁻³) durante 2 horas.</i>	<i>78</i>
<i>Fig. 35 – Percentagem de metal e não-metal das frações de SP que afundaram.</i>	<i>79</i>
<i>Fig. 36 – Percentagem de Cobre nas frações pesadas de SP após separação por densidade.</i>	<i>80</i>

LISTA DE TABELAS:

<i>Tabela 1 - Consumo de Energia na Produção Primária e Secundária de Metais (GJ/ton. de metal)⁽²⁴⁾</i>	9
<i>Tabela 2 – Composição Média de Placas de Circuito Impresso⁽³¹⁾</i>	11
<i>Tabela 3 – Tabela de Líquidos Densos e suas densidades empregadas em testes afunda/flutua⁽²⁵⁾</i>	24
<i>Tabela 4 – Principais materiais utilizados em suspensões⁽⁶²⁾</i>	26
<i>Tabela 5 – Alguns equipamentos de separação magnética e suas características⁽²⁴⁾</i>	39
<i>Tabela 6 – Lista 7 da NBR 10004 - Concentração Máxima (mg.L⁻¹) no Ensaio de Lixiviação⁽⁷¹⁾</i>	44
<i>Tabela 7 - Densidade de materiais presentes nas PCI (g.cm⁻³)⁽⁷⁵⁾</i>	57
<i>Tabela 8 – Composição química das Placas de Circuito Impresso.</i>	60
<i>Tabela 9 – Análise química das frações metálicas de PCI após separação granulométrica.</i> ..	66
<i>Tabela 10 – Percentagem de metal encontrado em média nos minérios e nas Placas de Circuito Impresso^(78,79,80)</i>	66
<i>Tabela 11 – Análise química das frações metálicas de CE após separação granulométrica.</i> ..	68
<i>Tabela 12 – Análise química das frações metálicas de SP após separação granulométrica.</i> ..	70
<i>Tabela 13 – Análise química das frações de PCI após separação por densidade.</i>	74
<i>Tabela 14 – Análise química das frações de CE após separação por densidade.</i>	77
<i>Tabela 15 – Análise química das frações de SP após separação por densidade.</i>	79
<i>Tabela 16 – Análise química do lixiviado das frações de PCI após separação granulométrica.</i>	83
<i>Tabela 17 – Análise química do Chumbo nas frações leves de PCI lixiviadas após separação por densidade.</i>	83

<i>Tabela 18 – Análise química dos lixiviados das frações de CE após separação granulométrica.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabela 19 – Análise química de Cd, Pb e Se nas frações leves de CE lixiviadas após separação por densidade.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabela 20 – Análise química das frações de SP lixiviadas após separação granulométrica. .</i>	<i>85</i>
<i>Tabela 21 – Análise química de Pb nas frações leves de SP lixiviadas após separação por densidade.</i>	<i>86</i>

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS:

% - Percentagem

(CH₃)₂O – Acetona

μm – Micrômetro

°C – Grau Celsius

A - Ampère

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Ag – Prata

Al – Alumínio

As – Arsênio

Ba – Bário

C - Carbono

Cd – Cádmiio

CE – Componentes Eletrônicos das Placas de Circuito Impresso

Cl - Cloro

CN - Cianeto

Cr – Cromo

Cu – Cobre

Cv – Cavalo vapor

Fe – Ferro

Fe₃O₄ – Magnetita

Fe-Si – Ferro Silício

g – Grama

g . cm⁻³ – Grama por centímetro cúbico

g . L⁻¹ – Grama por litro

GJ – 10⁹ Joule

H - Hidrogênio

HCl – Ácido Clorídrico

Hg – Mercúrio

HNO₃ – Ácido Nítrico

K - Potássio

mg . L⁻¹ – Miligrama por litro

mL – Mililitro
mm – Milímetro
N - Nitrogênio
Na - Sódio
NBR – Norma Brasileira
Ni – Níquel
O – Oxigênio
Pb – Chumbo
PC – Personal Computer
PCI – Placa de Circuito Impresso
pH – Potencial de Hidrogênio
PVC – Polivinilcloreto
S - Enxofre
Se – Selênio
Sn – Estanho
SP – Substrato de Placa de Circuito Impresso
TBE – Tetrabromoetano
ton. – Tonelada
Zn – Zinco

RESUMO

O grande desenvolvimento da indústria eletrônica, aliado ao aumento do consumo de bens pela população, gera um número cada vez maior de equipamentos defeituosos e obsoletos, entre eles as Placas de Circuito Impresso (PCI), as quais precisam ser dispostas.

A sucata destas placas representa uma matéria prima interessante, pois contém metais e ligas metálicas, o que torna sua reciclagem bastante atraente. Como linha geral, as PCI possuem 49% de materiais cerâmicos, vidros e óxidos, 19% de plásticos, 4% de bromo e 28% de metais. A composição real depende da origem do circuito impresso, assim como do tipo e idade do equipamento.

O uso do Processamento Mecânico na reciclagem desse resíduo é uma alternativa na recuperação dos metais presentes e também uma maneira de separar seus vários componentes, permitindo assim dispor adequadamente este resíduo.

Neste trabalho as PCI passaram por várias etapas de processamento mecânico. Primeiramente foram moídas abaixo de 1mm e após foram classificadas, caracterizadas e diferentes frações foram separadas por densidade. A primeira classificação foi feita por granulometria e gerou três frações diferentes: uma menor que 0,25mm, outra entre 0,25 e 0,50mm e outra entre 0,50 e 1,0mm. Após foi feita uma separação por densidade obtendo-se uma fração rica em metais, em especial o cobre, e outra fração leve composta por polímeros e cerâmicos.

As frações classificadas por granulometria e as frações leves originadas da separação por densidade foram lixiviadas para caracterizar o resíduo a respeito da sua toxicidade antes e depois do processo.

O uso do processamento mecânico mostrou-se muito eficiente na recuperação dos metais, pois foi possível recuperar cerca de 80% dos metais presentes, com destaque para o cobre, que representa quase 75% da fração metálica.

Através da lixiviação foi determinado que as PCI deveriam ser classificadas como resíduos perigosos, pois apresentam uma concentração de chumbo bem acima do permitido. Após a separação por densidade foi feito novamente ensaio de lixiviação e embora a concentração de Chumbo na fração leve tenha diminuído significativamente ela ainda permaneceu acima dos limites estabelecidos pelas normas brasileiras.

ABSTRACT

The development of the electronic industry associated with the increase in the use of electronic products by the population, increases the number of defective and obsolete equipment, including printed circuit boards (PCB), that need to be disposed.

The scrap boards represent an interesting material, since they are constituted by metals and metallic alloys, therefore, their recycling is very attractive.

In a general point of view, the PCB is 49% of ceramic materials, glasses and oxides, 19% of plastics, 4% of bromide and 28% of metals. The real composition depends on the circuit printed board characteristics, such as the type and age of the equipment.

The utilization of mechanic processing in the recycling of this type of waste is an alternative in the recovery of the metals and it is also a way to separate its several alloying components, to dispose the waste properly.

In this work, the PCB passed through several stages of mechanic processing. First, they were crushed below 1mm and after they were classified, characterized and separated according to density. The first classification was made by the particle size and it generated three different fractions: smaller than 0,25mm; between 0,25 and 0,50mm and between 0,50 and 1,0mm. After that, separation by density was made, generating a metal rich fraction (especially copper) and a lighter fraction, consisting of polymers and ceramics.

The fractions classified by the particle size and the light fractions originated from the separation by density were leached to characterize the waste in relation to its toxicity before and after the process.

The utilization of mechanic processing seems to be efficient, with the possibility of recovery of 80% of the metals, especially copper, which represents approximately 75% of the metallic fraction.

Through the leaching, it was determined the PCB should be classified a hazardous waste, because was found to have high lead concentration than allowed. After the separation by density, the lead concentration of lead in the light fractions reduces significantly, but it is still above the limit determined by the Brazilian Standard rules.

1 INTRODUÇÃO

Um dos setores da indústria que mais se desenvolve hoje em dia é o setor eletro/eletrônico⁽¹⁾. Aliado ao aumento do poder aquisitivo pela população o consumo de bens desta natureza tem crescido constantemente nas últimas décadas, e a previsão é de que aumente cada vez mais.

Os equipamentos eletro/eletrônicos tem em geral uma vida útil não muito longa⁽¹⁾, pois novos modelos com novas tecnologias surgem a cada dia. Como a produção e o consumo aumentam constantemente, a quantidade de equipamentos obsoletos ou defeituosos aumenta na mesma proporção. Esses equipamentos obsoletos ou defeituosos necessitam ser descartados.

Atualmente muita sucata de equipamento eletro/eletrônico é disposta junto com o lixo doméstico^(2,3,4), com exceção dos grandes aparelhos (geladeiras, fogões, etc.) cujos materiais são reutilizados pela indústria de produção secundária de metais. Assim, os equipamentos menores são depositados em aterros sanitários ou queimados sem nenhum tratamento prévio.

As Placas de Circuito Impresso (PCI), que são muito utilizadas em equipamentos da indústria eletro/eletrônica, fazem parte dessa sucata.

A sua composição é muito heterogênea, e é composta de uma maneira geral de plásticos, cerâmicos, metais base e metais preciosos^(3,4,5,6). Toda essa mistura torna sua reciclagem bastante difícil, mas em compensação, a presença de metais e metais preciosos a torna uma matéria prima interessante.

Também a presença de substâncias poluentes na sua composição estimula estudos para evitar a sua disposição diretamente no meio ambiente, podendo causar danos se dispostas de maneira inadequada.

Os primeiros estudos de reciclagem de PCI referem-se a equipamentos eletrônicos militares, devido a uma maior quantidade de metais preciosos presentes⁽⁷⁾.

Este trabalho está direcionado para as PCI usadas em computadores pessoais que são atualmente a maior fonte deste tipo de resíduo.

O objetivo do trabalho é caracterizar esse resíduo quanto a sua periculosidade, composição, densidade, granulometria, etc., bem como estabelecer as possibilidades de reciclagem dos metais presentes, em especial o cobre, através de processamento mecânico.

Os métodos utilizados para caracterizar as PCI foram análise química e lixiviação, para avaliação da periculosidade de acordo com a norma NBR 10005. Para o estudo da reciclagem de PCI foram utilizados os métodos de cominuição, separação granulométrica e separação por densidade.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A seguir será mostrada uma revisão na literatura que aborda estudos sobre reciclagem, em especial a reciclagem de materiais metálicos presentes em equipamentos eletrônicos, os métodos que podem ser empregados e os equipamentos provenientes de tratamento de minérios e carvão que poderiam ser adaptados para a reciclagem de PCI.

2.1 REUSO, RECUPERAÇÃO E RECICLAGEM

Encontrar novas fontes de energia e materiais está se tornando muito difícil. Concomitantemente, esta-se encontrando mais e mais dificuldades para encontrar locais para dispor resíduos sólidos, e o custo de disposição está aumentando exponencialmente. Como resultado, o interesse da sociedade em reuso, reciclagem e recuperação de materiais tem crescido⁽⁸⁾.

- Reuso: é o uso de um produto para um objetivo ao qual ele pode não ter sido projetado (pote de café usado para guardar pregos), ou então o uso prolongado de um produto (como pneus automotivos recapados).
- Reciclagem: quando um produto é coletado pelo público e então retorna para a indústria do setor (jornais e latas de alumínio retornam para fábricas de papel ou metalurgias secundárias de alumínio).
- Recuperação: quando o resíduo coletado é uma mistura de materiais, e então os materiais tem que ser removidos e separados através de várias etapas de processamento.

2.2 RECUPERAÇÃO E RECICLAGEM DE MATERIAIS METÁLICOS

A disposição de sucatas e resíduos em aterros implica na perda de materiais metálicos valiosos e no aumento de riscos de poluição por contaminação de áreas com componentes metálicos. O conceito de não-geração de resíduos e de um sistema de gerenciamento que busque a minimização, reutilização, reciclagem, tratamento e destinação está citado no Decreto N.º 38.356 (01/04/1998)⁽⁹⁾, o qual dispõe sobre a gestão de resíduos sólidos no Estado do Rio Grande do Sul.

Além disso a lei N.º 11.187 (07/07/1998)⁽¹⁰⁾ veta o descarte de artefatos que contenham metais pesados em lixo doméstico ou comercial no estado do Rio Grande do Sul.

A instalação de processos que reduzam e reutilizem em circuito fechado os resíduos gerados é interesse de todos. Assim, as bases de um processo orientado para a aceitação ambiental são:

- Medidas Primárias: Diminuir ou evitar a geração de resíduos;
- Medidas Secundárias: Reutilizar os resíduos;
- Medidas Terciárias: Dispor de maneira compatível ao meio ambiente, ou seja, resíduos que não podem ser reutilizados devem estar de tal forma inertes, que possam ser depositados sem impacto às zonas adjacentes.

Desta forma, permanecem duas alternativas para o futuro da indústria:

- A instalação de processos que reduzam e reutilizem em circuito fechado os resíduos gerados;
- A produção de um resíduo que possa ser facilmente vendido para reciclagem.

Pietrelli⁽¹¹⁾ em seu artigo estuda as tecnologias de separação com o intuito de aumentar a reciclagem de materiais do ponto de vista econômico e ambiental, sempre buscando o desenvolvimento sustentável. O desenvolvimento de tecnologias de processos mais eficientes para o reuso interno dos resíduos (substituição de matéria prima) deve ser estimulado.

No artigo de Larrauri⁽¹²⁾ são estudadas técnicas para recolher, separar e reciclar resíduos, incluindo estudos de compatibilidade e processamento de plásticos e processos para tratar de resíduos sólidos municipais. Bailey⁽¹³⁾ em seu artigo faz uma revisão das rotinas de processamento para recuperar metais preciosos, revê algumas tendências da indústria e aponta algumas possibilidades futuras de processamento.

A avaliação ou análise do ciclo de vida de um produto é muito importante para avaliar o consumo de recursos (riquezas) e a “responsabilidade” ambiental que está associada com um produto, processo ou atividade^(14,15).

A avaliação é conduzida no sentido de identificar e quantificar a energia e o material usado e a relação com o meio ambiente através de todos os estágios do ciclo de vida de um produto. Há quatro componentes básicos na análise do ciclo de vida⁽¹⁴⁾:

- **Composição e Extensão das Metas:** Antes de iniciar uma avaliação a empresa deve avaliar os objetivos e a extensão da avaliação que pretende fazer.
- **Inventário do Ciclo de Vida:** Esse inventário envolve o exame da quantidade que entra e que sai de cada etapa em um ciclo de vida de um produto.
- **Avaliação do Impacto:** Esse componente envolve o potencial e os efeitos na saúde humana e no meio ambiente que são relatados no uso dos recursos e do meio ambiente.
- **Análise das Melhorias no Ciclo de Vida:** Envolve análise das mudanças que foram necessárias em um produto ou processo para trazer melhorias ao meio ambiente.

Há quatro estágios no ciclo de vida de um produto: **I)** extração e processamento da matéria prima; **II)** fabricação; **III)** uso, reuso e manutenção e **IV)** destino final do produto.

I. Extração e Processamento de Matéria Prima:

No primeiro estágio do ciclo de vida os impactos ambientais da extração e processamento de matéria prima para o produto devem ser consideradas. Simplesmente usando recursos renováveis e substituindo os materiais virgens pelos materiais reciclados pode-se diminuir os custos ambientais neste estágio⁽¹⁴⁾.

II. Fabricação:

Muita atenção deve ser concentrada neste estágio. A dificuldade é que grande parte da atenção tem sido dada no chamado controle de “fim de tubo”. Em outras palavras, o foco tem sido tratar a água contaminada e os outros resíduos industriais e não minimizar a produção destes resíduos durante a manufatura. Mais recentemente a atenção tem se concentrado no desenvolvimento de métodos para reduzir a geração de poluentes em sua origem. Por

exemplo, os produtos podem e devem ser projetados para uma fácil montagem para ajudar a reduzir defeitos e retornos desnecessários para a linha de montagem; produtos podem usar moldes finos de superfície plástica para evitar os efeitos ambientais da pintura; os materiais devem ser projetados para serem mais compatíveis com um ambiente saudável como os solventes a base de água⁽¹⁴⁾.

III. Uso, Reuso e Manutenção:

Esse estágio envolve, por exemplo, leis federais sobre eficiência dos combustíveis e emissões padrões para automóveis e iniciativas baseadas em projetos que reduzem o uso de energia necessária para produtos como computadores, refrigeradores e máquinas de lavar⁽¹⁴⁾.

IV. Destino Final:

Até recentemente este estágio merecia pouca atenção mas com o recente foco nas grandes quantidades de resíduos sólidos perigosos que estão sendo gerados tem-se tornado o elemento mais importante no ciclo de vida. Companhias estão sendo agora encorajadas a projetar seus produtos com o reuso e a reciclagem em mente. O projeto levando em consideração o destino final deve envolver os seguintes critérios⁽¹⁴⁾:

a) Design para Reciclagem:

Design para reciclagem está focado na redução do impacto do produto para o ambiente quando alcança o fim da sua vida útil. Isso envolve a tentativa de facilitar a completa separação dos componentes do produto para que componentes recicláveis possam ser separados e reciclados e componentes não recicláveis possam ser dispostos de maneira adequada. Isso torna o material reciclável mais valioso, entretanto, as pessoas devem estar mais aptas para a idéia da reciclagem. Também, a separação torna-se mais fácil e barata, isso também é chamado de “Design para Desmontagem”^(14,16). Se um material deve ser recuperado ou reusado no fim da vida útil de um produto, “Design para Desmontagem” deve ser o caminho para uma recuperação economicamente possível⁽¹⁷⁾.

Novos produtos assim como as próprias companhias estão conduzindo tentativas de aplicar “Design para Desmontagem”. Por exemplo, o automóvel BMW Z1 tem todos os

plásticos externos projetados para serem completamente desmontados do chassis em 20 minutos⁽¹⁷⁾.

Um guia de “Design para Meio Ambiente” inclui⁽¹⁷⁾:

- Ter certeza de que todos os envolvidos no projeto do produto entendam completamente os princípios de “Design para Meio Ambiente”.
- Evitar o uso de materiais tóxicos (tanto quanto possível) nos produtos e nos processos de fabricação.
- Projetar o produto e seus componentes para ser reusável ou reciclável.
- Minimizar o número de partes.
- Minimizar a quantidade de material no produto.
- Utilizar o número mínimo de parafusos no produto ou numa porção do produto.
- Usar a menor quantidade de prendedores para que reduza o tempo de desmontagem.
- Projetar partes para que prendedores sejam bem visíveis e acessíveis para ajudar na desmontagem.
- Minimizar o número de diferentes materiais no produto.
- Se o número de diferentes materiais não puder ser reduzido por razões econômicas de fabricação ou outras razões, escolher materiais que são compatíveis e podem ser reciclados juntos.
- Evitar o uso de materiais compósitos como vidros e metais reforçados com plásticos.
- Padronizar componentes (e submontagem) para ajudar numa eventual renovação dos produtos.
- Usar moldes com nomenclatura em vez de rótulos para identificação de produtos.
- Usar projetos modulados.
- Onde possível (ex: partes moldadas ou fundidas) identificar do que é feito o material.
- Fazer pontos de separação entre partes tão visível quanto possível.
- Evitar projetos que requerem pintura por spray na etapa final.
- Usar uma malha de metal entrelaçado (mais facilmente removível) em vez de material preenchido com metal para soldar termoplásticos.
- Projetar o produto para usar material reciclado de outras fontes.

b) Design para Remanufatura:

Partes em um produto geralmente esgotam-se a taxas diferentes. Projetar para remanufaturar permite a troca de componentes e deste modo os resíduos totais são diminuídos. Um exemplo disso é a Xerox que desenvolveu para seus clientes unidades de troca projetadas para trocar o conteúdo dos cartuchos de copiadoras sem trocar o cartucho inteiro⁽¹⁴⁾.

c) Design para Dispor:

Considerações de projeto neste estágio devem estar focados na maneira de garantir que o produto possa ser disposto de maneira segura⁽¹⁴⁾.

Dentro da indústria de equipamentos eletrônicos, os conceitos de ciclo de vida e “design de desmontagem” implicam em ações para que no futuro, as partes dos equipamentos sejam de tal forma montadas, que processos automáticos de desmontagem e reaproveitamento de materiais possam ser aplicados, quando da inutilização do aparelho. Este estágio de desenvolvimento entretanto ainda não foi alcançado industrialmente. Na Alemanha um trabalho conjunto entre a Technische Universität Dresden e a empresa Würth Elektronik GmbH⁽¹⁸⁾ tem estudado técnicas para produzir Placas de Circuito Impresso que podem ter seus materiais separados e reciclados após o fim do ciclo de vida da placa. Koch⁽¹⁹⁾ em seu artigo também fala sobre a importância de um processo integrado de desmontagem e processamento de sucata eletrônica. Frear⁽²⁰⁾ em seu artigo fala sobre as linhas de montagem das Placas de Circuito Impresso, o que elas devem suportar em termos de temperatura, choques, etc. e na tendência de diminuição cada vez maior no tamanho dos componentes que compõem as placas.

Desta forma, a reciclagem dos metais presentes nas placas de circuito impresso deve ser estudada, evitando-se assim a geração e conseqüente disposição de toneladas de resíduos perigosos.

Vejamos alguns dados interessantes:

- Nos Estados Unidos cerca de 75% de todos os equipamentos elétricos e eletrônicos usados são armazenados, 15% são colocados em aterros, 7% é revendido e 3% é reciclado⁽⁴⁾.

- Em 1991 nos Estados Unidos cerca de 10 milhões de Computadores Pessoais (PCs) foram colocados em aterros, e até 2005, mantendo-se a mesma taxa, cerca de 150 milhões de PCs serão enviados a aterros. Considerando como peso médio de um PC 25kg, isso irá representar 3,75 milhões de toneladas em 2005⁽⁴⁾.
- Em 1993 na Alemanha gerou-se em torno de 1,2 – 1,5 milhões de toneladas de sucata eletrônica. Com uma taxa de crescimento estimada em 5-10% anualmente, em 2000 alcançou-se 2,0-2,5 milhões de toneladas⁽⁴⁾.
- Nos EUA aproximadamente 25% do total da demanda de metais preciosos usados pelas indústrias é obtido de material reciclado⁽²¹⁾.
- Em 5 de julho de 1997, Taiwan declarou que as sucatas de computadores eram de responsabilidade dos fabricantes, importadores e vendedores e que estes deveriam criar programas de reciclagem para esse tipo de sucata, que chegavam a 300.000 sucatas de computadores pessoais por ano⁽²²⁾.
- Em Taiwan são produzidos aproximadamente 18 milhões de toneladas por ano de resíduos industriais. 1,47 milhões de toneladas são resíduos perigosos e dentro de resíduos perigosos as indústrias de produtos elétricos e eletrônicos ocupam o primeiro lugar com 43%, aproximadamente 630.000 toneladas por ano⁽²³⁾.
- No começo do século as minas de cobre economicamente interessantes tinham na ordem de 4% de cobre. Atualmente as minas exploradas tem no máximo 1% de cobre⁽²⁴⁾.

Portanto a reciclagem de materiais metálicos é importante pois pode representar um ganho econômico, próprio do metal, sendo este significativo em metais como cobre, chumbo, alumínio e, particularmente, nos metais nobres: ouro, prata e platina. Outra vantagem da reutilização de sucatas está na economia de energia⁽²⁴⁾, como visto na tabela 1. No processo primário de produção de metais, o metal é obtido através da redução do minério com elevado consumo de energia. No processo secundário o metal é obtido basicamente da fusão da sucata, já em estado metálico, e o consumo de energia é muito menor.

Tabela 1 - Consumo de Energia na Produção Primária e Secundária de Metais (GJ/ton. de metal)⁽²⁴⁾.

<i>METAL</i>	Produção Primária	Produção Secundária	Economia (%)
Magnésio	372	10	97
Alumínio	253	13	95
Níquel	150	16	89
Cobre	116	19	83
Zinco	68	19	72
Aço	33	14	57
Chumbo	28	10	64

2.3 PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

As Placas de Circuito Impresso são utilizadas em muitas áreas da indústria eletro-eletrônica, mas principalmente nas áreas de processamento de dados e de entretenimento, equipamentos que podem conter cerca de 30% em peso de PCI⁽³⁾.

A composição dessas placas é extremamente heterogênea, o que dificulta a sua reciclagem⁽¹⁾. Mas, por outro lado, a presença de metais em sua composição^(3,4,5,7,25,26,27) torna as PCI uma matéria prima interessante. Além disso as PCI contém materiais poluentes^(24,25,28,29) ao meio ambiente quando dispostos de maneira inadequada, tornando sua reciclagem além de interessante economicamente também necessária ambientalmente.

Em Taiwan, os resíduos de PCI chegam a atingir 100 mil toneladas por ano⁽²⁹⁾. Na Alemanha subiram de 55.000 t/ano⁽³⁾ em 1995 para 75.000 t/ano em 2000⁽¹⁸⁾ e na Coréia em 1994 atingiram 1.500 toneladas, tendendo a crescer muito⁽³⁰⁾.

Os primeiros estudos para reciclagem de sucatas eletrônicas datam de 1969, quando o U. S. Bureau of Mines⁽⁷⁾ começou a investigar procedimentos para recuperar metais preciosos

de sucatas eletrônicas militares obsoletas ou danificadas que atingiam mais de 9100 toneladas por ano.

A composição das Placas de Circuito Impresso, componentes importantes das sucatas eletrônicas, varia de acordo com a idade e com o tipo de placa⁽²⁶⁾. Em linhas gerais as PCI são compostas de vários metais e ligas metálicas assim como compostos orgânicos e inorgânicos:

- Polímeros: em média 30% em peso, principalmente poliolefinas, poliésteres e policarbonatos.
- Óxidos Refratários: em torno de 30% em peso, onde a sílica é 50%, alumina 20%, óxidos de terras raras 20% e 10% de outros óxidos.
- Metais Base: em torno de 40% do peso total, composto de 50% de cobre, 20% de ferro, 10% de estanho, 5% de níquel, 5% de chumbo, 5% de alumínio e 3% de zinco.
- Metais Preciosos: em torno de 1655 g/ton. de prata, 850 g/ton. de ouro e 42 g/ton. de paládio.

A seguir é apresentada a tabela 2 mostrando o resultado de uma caracterização química de Placas de Circuito Impresso feita por Angerer et al.⁽³¹⁾. A tabela 2 não apresenta dados para o Chumbo e o Silício. Outros autores mostram esses resultados e indicam para Placas de Circuito Impresso 10.000 ppm de Chumbo⁽³²⁾ e 91.400 ppm de Silício⁽³³⁾.

Tabela 2 – Composição Média de Placas de Circuito Impresso⁽³¹⁾.

Elemento	PC atual (ppm)	Equip. Áudio / Vídeo (ppm)	PC obsoleto (ppm)
Ag	757	674	1.053
Al	48.000	63.600	47.400
As	<52	<33	<71
Au	92	31	70
Ba	3.580	2.260	6.140
Br	27.000	14.760	29.500
Cd	395	347	326
Ce	51	21	22
Cl	1.860	3.160	1.490
Co	83	91	88
Cr	1.610	997	1.075
Cs	1,7	1,6	<1,9
Cu	37.000	44.900	29.800
Eu	1,9	1,6	1,4
Fe	108.300	108.700	76.800
Ga	<1.000	<760	<1.270
Ge	<240.000	<180.000	<290.000
Hf	5,3	5,5	11,3
Hg	9,0	8,3	<17
In	<1,9	<2,3	<2,1
Ir	<0,05	<0,03	<0,04
J	<170	<170	<150
K	<102.000	<95.000	<90.000
La	29	71	27
Lu	<0,5	<0,4	<0,5
Mn	21.500	16.300	17.800
Mo	155	<130	579
Na	1.840	2.070	1.580
Ni	3.160	7.250	2.040
Pd	<1.210	<1.100	<1.500
Pr	<750	<740	<1.130
Rb	<112	<47	<60
Rh	<2.100	<2.100	<1.600
Ru	<57	17	<61
Sb	4.500	2.820	4.150
Sc	1,7	2,7	3,1
Se	<10	<6	<11
Sn	31.350	33.400	16.300
Sr	<930	<730	<890
Ta	192	59	113
Tb	<0,7	<0,6	<0,9
Th	2,7	2,7	4,3
Ti	<13.000	<13.000	<10.300
U	<36	<26	<40
V	<200	<190	<130
W	<63	<46	<88
Yb	<4	<2	<4
Zn	14.500	21.500	14.160
Zr	<1.000	384	<660

A grande concentração de cobre em sucatas de equipamentos eletrônicos, quando comparados a minérios de cobre, foi discutida por Legarth⁽³⁴⁾ e justifica processos de reciclagem.

2.4 MÉTODOS DE PROCESSAMENTO

O tratamento de Placas de Circuito Impresso é um processo bastante complexo devido à grande heterogeneidade da sua composição e também devido à difícil compatibilidade com o meio ambiente.

As tecnologias usadas para a reciclagem das PCI incluem processos mecânicos, químicos e térmicos. Os quatro principais processos são: Pirometalurgia, Hidrometalurgia, Eletrometalurgia e Processamento Mecânico. Há ainda referência na literatura do uso de Biotecnologia.

A figura 1 apresenta uma visão bem geral de algumas possibilidades de processamento das PCI.

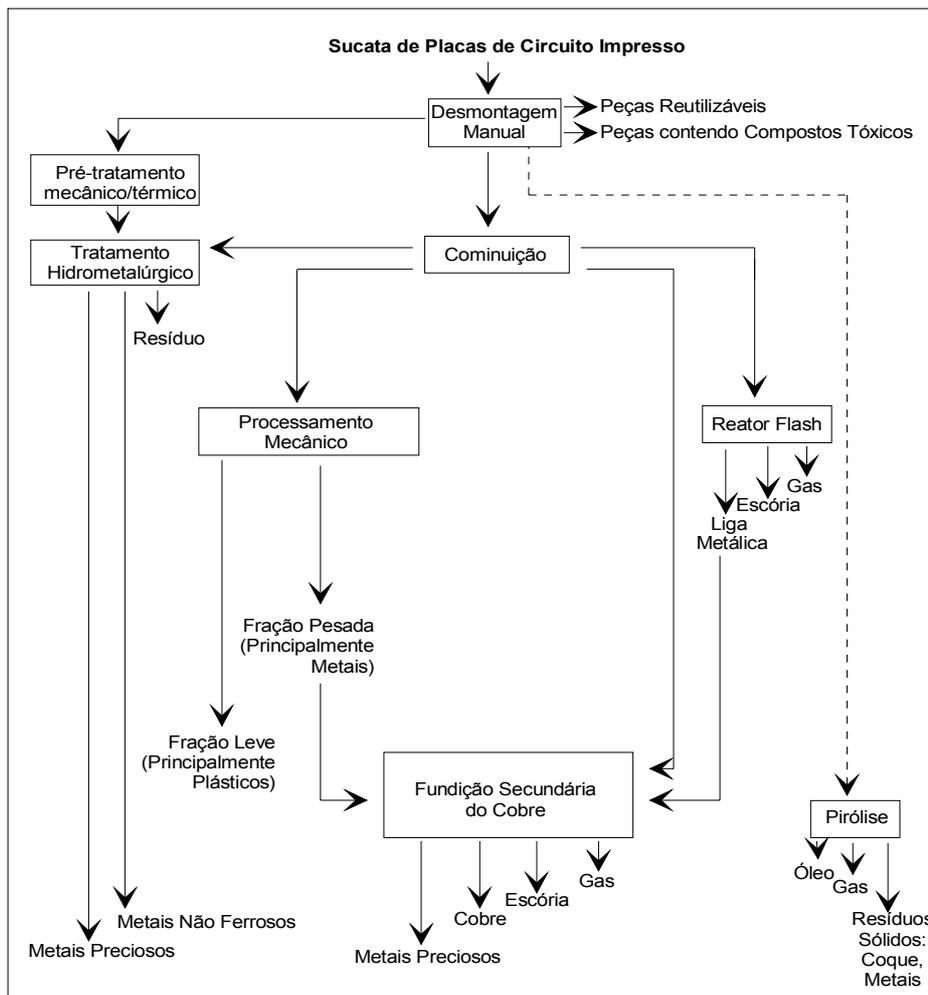


Fig. 1 – Esquema de algumas possibilidades de processamento de sucatas de placas de circuito impresso⁽³⁾.

2.4.1 PIROMETALURGIA

Processamentos pirometalúrgicos incluem: Incineração, Fusão, Pirólise, Sinterização, Reações da fase gasosa em alta temperatura, entre outros.

O processamento pirometalúrgico convencional é essencialmente um mecanismo de concentração de metais em uma fase metálica e a rejeição da maioria dos materiais estranhos em uma fase escória⁽²⁶⁾. Mas nem sempre os metais são a fase que interessa. Masatoshi⁽³⁵⁾ em seu artigo, estudou a recuperação da sílica que está presente como preenchimento na resina epóxi usada nos moldes dos componentes eletrônicos através de Pirólise. Essa resina que contém cerca de 70 – 85% em peso de sílica foi recuperada e a sílica reciclada está suficientemente pura para ser empregada em moldes numa resina original.

A incineração é a maneira mais comum de desfazer-se dos materiais plásticos e outros materiais orgânicos presentes nos concentrados de metais⁽⁷⁾. A sucata triturada pode ser queimada em um forno para remover os plásticos, deixando um resíduo metálico. A fusão de um concentrado de metal bruto pode produzir ligas metálicas impuras. Essas ligas podem então ser refinadas eletroliticamente ou pirometalurgicamente.

O processamento pirometalúrgico tem algumas vantagens como: aceitar qualquer tipo de sucata eletrônica, não requerer um pré-tratamento e ter poucas etapas. Schichang et al.⁽³⁶⁾ mostraram que outros materiais, além de sucata eletrônica, podem ser reciclados usando processos pirometalúrgicos, como a recuperação de Irídio que fica depositado em cadinhos, ou a reciclagem de sucata de berílio que foi reutilizada na produção de eletrodos de soldagem.

Processos pirometalúrgicos são bastante usados na recuperação de metais preciosos e Szczygiel et al.⁽³⁷⁾ mostram em seu artigo que é possível recuperar metais preciosos de materiais sulfurosos (sulfetos minerais) através de uma redução direta sem contaminar a atmosfera, já que as emissões de dióxido de enxofre são mínimas e o enxofre permanece na escória. Para isso é necessário o uso de chumbo na carga do forno para coletar os metais preciosos.

Alguns dos métodos envolvendo processamento térmico de sucata eletrônica podem causar os seguintes problemas^(6,7).

- Plásticos e outros materiais isolantes são uma fonte de poluição do ar através da formação de dioxinas e furanos.
- Os metais nobres podem ser perdidos através da volatilização de seus cloretos.

- Componentes cerâmicos e vidros das sucatas aumentam a quantidade de escória no forno, aumentando as perdas de metais nobres e de metais base.
- A recuperação de outros metais é baixa (ex. Sn e Pb) ou praticamente impossível (ex. Al e Zn).

2.4.2 HIDROMETALURGIA

Os passos no processamento hidrometalúrgico consistem de uma série de ataques de soluções ácidas ou cáusticas^(27,38) para dissolver o material sólido. As soluções são então submetidas a procedimentos de separação como extração por solvente, precipitação, cementação, troca iônica, filtração e destilação para isolar e concentrar os metais de interesse⁽⁷⁾.

Gluszczyszyn et al.⁽³⁹⁾ estudaram a reciclagem de ouro de sucatas eletrônicas através da hidrometalurgia. Os autores primeiramente usaram processamento mecânico, como cominuição e separação magnética, para depois utilizar um método hidrometalúrgico. Uma primeira dissolução foi feita utilizando H_2SO_4 e H_2O_2 e numa segunda etapa foi feito um ataque com Água-Régia. Após uma redução direta foi obtido ouro concentrado.

Assim como Gluszczyszyn⁽³⁹⁾, Vejnar⁽⁴⁰⁾ também estudou a recuperação de ouro contido em Placas de Circuito Impresso além de outros três tipos de sucatas: sucata de termopares de platina usados para medir a temperatura de aços fundidos, tungstênio contido em cadinhos e velhos contatos de prata-tungstênio produzidos por meio da metalurgia do pó. Com relação ao ouro, ele fez uma lixiviação da Placas de Circuito Impresso em uma solução de H_2SO_4 durante 24 dias e obteve como resultado 0,25% em peso de ouro do total da amostra de PCI que era de 350 gramas. Como desvantagem pode-se citar o tempo necessário e como vantagem a não necessidade do uso de energia.

O processamento hidrometalúrgico direto de metais preciosos raramente alcançam uma completa extração de todo o conteúdo⁽²⁶⁾. Deste modo os resíduos do processamento hidrometalúrgico freqüentemente são enviados a uma fundição de níquel ou cobre para promover outro processamento.

O processamento hidrometalúrgico pode ainda ser usado para outro tipo de sucata, como mostra Reinhard⁽⁴¹⁾ em seu artigo sobre a recuperação de baterias zinco-carbono, alcalina-manganês e níquel-cádmio. Para isso ele usou processamento mecânico como

preparação e após foram usados processos hidrometalúrgicos em conjunto com troca-iônica, extração por solvente, eletrodialise e recuperação eletrolítica.

As principais vantagens do processamento hidrometalúrgico de sucata eletrônica sobre métodos pirometalúrgicos são^(7,38):

- Melhor proteção ambiental com relação a riscos de poluição atmosférica
- Separação mais fácil dos principais componentes da sucata
- Redução dos custos de processo (ex. baixo consumo de energia e reciclagem dos reagentes químicos).

As desvantagens são:

- Dificuldade em aceitar sucatas eletrônicas mais complexas.
- Necessidade de processar mecanicamente as sucatas para reduzir o volume.
- O ataque químico só é efetivo se o metal estiver exposto.
- Grande volume de soluções.
- Efluentes contendo metais base que são corrosivos, tóxicos ou ambos.
- Geração de resíduos sólidos.

2.4.3 BIOTECNOLOGIA

O uso de bactérias em reciclagem de metais está citado na literatura⁽⁷⁾, mais especificamente na recuperação de ouro de resíduos dourados de equipamentos eletrônicos. No experimento descrito por Sum⁽⁷⁾ a sucata foi tratada em uma solução contendo 10 g.L⁻¹ de Fe⁺³ e uma cultura de bactéria (YTL-2) com pH < 2,5 e temperatura de 20 – 35°C. Depois de 2 dias, 97% do ouro foi recuperado na forma de lâmina. Os elementos não dourados, que normalmente mantém sua forma original, foram facilmente separados. A solução foi reciclada depois da regeneração das bactérias.

A principal vantagem desse processo é que é simples, barato e fácil de operar. A principal limitação são os longos períodos de “ataque” (48 horas) e a necessidade do ouro estar exposto, como uma camada superficial.

2.4.4 ELETROMETALURGIA

A maioria dos processamentos eletroquímicos associados com a reciclagem de sucatas eletrônicas são passos de refinamento para recuperar no fim o metal puro⁽²⁶⁾. Processos de eletrorefino são usualmente efetuados em eletrólitos aquosos ou sais fundidos. Ganni⁽⁴²⁾ em seu artigo descreve as técnicas existentes para recuperar/reciclar descargas aquosas de processos de acabamento (polimento, deposição, etc.) contendo metais. Já Pletcher⁽⁴³⁾ fala sobre a tecnologia eletroquímica aplicada para a “limpeza do meio ambiente”. Explica como essa tecnologia pode melhorar a relação com o meio ambiente.

Existem diversos estudos baseados em técnicas eletroquímicas com o objetivo de recuperar metais dos mais variados tipos de resíduos. Schwartz et al.⁽⁴⁴⁾ estudaram a remoção e recuperação eletroquímica de prata, cobre e zinco de fluxos de resíduos. Já Njau⁽⁴⁵⁾ estudou a remoção de níquel e cromo de águas de processos galvânicos através de eletrólise. Nesse artigo a natureza do depósito de níquel e a corrente de deposição como uma função dos parâmetros da eletrólise são dados em detalhe. Além disso, os resultados da redução do cromo são descritos e uma atenção especial é dada aos efeitos do material que compõem o cátodo e a composição da solução.

Fornari⁽⁴⁶⁾ utilizou o eletrorefino para fazer uma recuperação seletiva de cobre e níquel provenientes de soluções de indústrias galvânicas e eletrônicas.

Se os metais forem concentrados através de hidrometalurgia (ex. dissolução seletiva, troca iônica ou extração por solvente) eles podem ser eletrodepositados diretamente das soluções aquosas sobre o cátodo⁽⁷⁾. Por exemplo, em uma solução de sulfato contendo cobre e níquel pode-se eletrodepositar o metal cobre, deixando o níquel em solução.

Os ânodos de cobre impuros contendo metais preciosos oriundos da pirometalurgia são normalmente purificados fazendo-se uma dissolução anódica do cobre, que é então depositado como cobre puro no cátodo. Os metais preciosos são concentrados no lodo anódico que são então tratados hidrometalurgicamente ou eletroliticamente para recuperar ouro, prata, paládio ou platina⁽⁷⁾.

Brown⁽⁴⁷⁾ relata em seu artigo sobre a recuperação de metais por troca-iônica e eletrorefino citando as bases de cada processo e como e onde podem ser aplicados.

Kékesi et al.⁽⁴⁸⁾ estudaram a recuperação de estanho a partir de placas estanhadas por métodos químicos e eletroquímicos e chegaram a conclusão que o processamento eletroquímico através da eletrólise possui vantagens práticas sobre os métodos químicos.

Na eletrólise com sais fundidos tem-se as desvantagens da alta energia requerida e o rigoroso controle das emissões atmosféricas de cloretos e fluoretos. Além disso a alta temperatura e a natureza corrosiva dos eletrólitos e seus vapores limitam a escolha dos materiais usados na construção dos sistemas de eletrólise.

Dini⁽⁴⁹⁾ apresenta a técnica de Voltametria Cíclica como sendo talvez o método eletroanalítico mais amplamente usado para estudar os processos eletroquímicos. Mostra também o uso da Voltametria Cíclica para controlar soluções de Pirofosfato de Cobre usadas na produção de Placas de Circuito Impresso.

Com relação aos metais preciosos as vantagens dos processos eletrometalúrgicos são os seguintes⁽⁷⁾:

- Poucas etapas.
- O concentrado de metais preciosos a partir da eletrólise representa 95 – 97% do metal encontrado na sucata. A quantidade de metais preciosos no lodo anódico depois de fundição e de eletrólise como refinação é muito baixo.
- É aplicável em todos os tipos de sucatas contendo uma camada superficial de metais preciosos sobre um substrato de metal base.
- Todos os metais preciosos podem ser dissolvidos simultaneamente ou seletivamente (se necessário), e o substrato a base de cobre permanece inalterado.
- O eletrólito pode ser reciclado.

A principal limitação é o tipo de sucata eletrônica que pode ser usada como alimentação ou seja, a sucata tem de ser pré-classificada.

2.4.5 PROCESSOS MECÂNICOS

Processos mecânicos de separação de materiais tem sido utilizados como parte de etapas de tratamento e beneficiamento de minérios na metalurgia primária. O processamento mecânico de sucatas é visto, em geral, como um pré-tratamento para o real reaproveitamento dos materiais, e associa diferentes estágios de separação de compostos e componentes do resíduo^(4,5,24,25,28,50,51). Atualmente vários estudos tem sido realizados para o processamento mecânico de sucatas eletrônicas, onde existe uma grande mistura de materiais. Assim, fazem parte deste processo a cominuição⁽²⁴⁾, classificação⁽²⁴⁾ e separação^(24,50) (por diferença de densidade, peso, granulometria, propriedades magnéticas e propriedade elétricas).

Como o processamento mecânico é a base desse trabalho, o próximo capítulo será usado para descrever as várias técnicas que existem nesta área.

2.5 PROCESSAMENTO MECÂNICO

Fazem parte do processamento mecânico entre outras, as operações de cominuição, classificação, separação gravimétrica, separação magnética, separação a base de propriedades elétricas, etc.

A seguir são apresentadas cada uma delas dando atenção especial a separação gravimétrica.

2.5.1 COMINUIÇÃO

A Cominuição ou redução de tamanho ou moagem nada mais é do que a ação de uma força bruta fragmentando a sucata pelo movimento de “martelos”, “bolas” ou “facas” dentro de um compartimento fechado. O mecanismo utilizado pode ser: pressão, impacto, abrasão ou corte. Dois tipos de moinhos são usados no processamento de resíduos sólidos: moinhos verticais e horizontais. Nos moinhos verticais, o resíduo entra pelo topo e deve ser quebrado de modo a passar o mais rápido possível pelos “martelos” ou “facas” em movimento, esvaziando os espaços entre as paredes do equipamento e os “martelos” ou “facas”. O controle do tamanho da partícula é ajustado pela distância entre os “martelos” ou “facas” e as

paredes. Nos moinhos horizontais os “martelos” oscilam acima de uma grade que pode ser mudada dependendo do tamanho do produto requerido⁽²⁴⁾.

Para a redução de produtos eletrônicos os seguintes equipamentos são geralmente usados:

- Shredder (moinho de martelos): a redução é obtida por martelos capazes de girar sobre um eixo. O material é destruído pelos martelos e pela colisão com as paredes do moinho. Um moinho de martelos tem uma grade na parte inferior onde o material cai após ser suficientemente reduzido⁽⁵²⁾.
- Moinho de Corte: a redução é obtida pelo corte do material usando facas montadas em dois eixos girando em direções opostas. Frequentemente há uma grade no fundo. Moinhos de corte são especialmente adequados para reduzir materiais elásticos (dúcteis)⁽⁵²⁾.
- Fragilização Criogênica: é um processo para reduzir materiais pelo congelamento a temperaturas muito baixas com a ajuda de nitrogênio líquido. O aumento na fragilidade do material aumenta a eficiência do moinho e a separação dos materiais.

O material produzido na redução é classificado para obter frações puras. Essa classificação pode ser executada por técnicas mecânicas a seco que tem a vantagem de menor custo⁽⁵²⁾.

2.5.2 CLASSIFICAÇÃO

O material após passar pela cominuição geralmente deve ser classificado. Isso é feito através de peneiras que são superfícies perfuradas ou vazadas sobre a qual se dá o movimento de partículas. As partículas menores que as perfurações tendem a passar através dessas perfurações, enquanto as partículas maiores permanecem acima da superfície vazada. Esse processo separa o material somente pelo tamanho das partículas e não identifica o material por qualquer outra propriedade. Consequentemente, peneiras são frequentemente usadas em

recuperação de materiais como um passo de classificação antes de um processo de separação de materiais. Algumas vezes após essa etapa já é possível obter frações enriquecidas em certos materiais, os quais podem ser separados do fluxo principal⁽²⁴⁾. Esta separação é função da diferença na moagem de materiais dúcteis ou frágeis, o que possibilita a formação de uma fração mais concentrada em um determinado material.

A eficiência do peneiramento pode ser afetada por vários fatores:

Material:

- Densidade
- Distribuição do tamanho de partículas
- Forma das partículas
- Superfície das partículas

Equipamento:

- Superfície da peneira (área, % de área que é vazada, tamanho dos orifícios, forma dos orifícios e espessura da peneira)
- Movimento (amplitude, frequência, direção)
- Ângulo de inclinação
- Método de alimentação da peneira

2.5.3 SEPARAÇÃO GRAVIMÉTRICA

Esse tipo de separação e concentração de materiais é baseado na diferença de densidade que existe entre os diversos tipos de materiais. Originalmente todas as técnicas de separação e concentração gravimétrica foram baseadas na separação de minérios e também na limpeza de carvões, mas atualmente essas técnicas estão sendo adaptadas para outras áreas, até para a própria limpeza de águas usadas nos processamentos minerais, como mostra Hayes⁽²⁴⁾.

Noakes⁽⁵³⁾ e Sandvik⁽⁵⁴⁾ mostram em seus artigos que as tecnologias de processamento mineral atualmente empregadas podem ser facilmente e efetivamente adaptadas para o controle de materiais contaminantes e na remediação ambiental de resíduos ou substâncias perigosas. Peace⁽⁵⁵⁾ aplica processos de separação por densidade para recuperar materiais

metálicos de lixo urbano. Jody et al.^(56,57,58) aplicaram métodos de separação utilizando colunas com fluxo de ar para separar espumas de poliuretanos de outros finos resultantes da reciclagem de automóveis.

Fazem parte de Separação Gravimétrica, entre outros processos, a utilização de: Líquidos Densos (utilizado neste trabalho) e as Suspensões, Jigues e Filmes d'Água (que podem futuramente ser adaptados para um processamento em larga escala).

2.5.3.1 Líquidos Densos

O processo mais simples de separação gravimétrica envolve o uso de líquidos de alta densidade relativa. Essa técnica é usada para separar partículas sólidas por meio da diferença de densidade. As partículas que tem de ser separadas são imersas em um líquido que tem um valor de densidade entre os valores de densidade dos dois componentes que se pretende separar.

As partículas mais pesadas vão para o fundo enquanto as partículas mais leves flutuam na superfície⁽⁵²⁾.

A separação de misturas de materiais em frações de densidades variadas é uma das técnicas mais usadas em laboratório servindo a muitos objetivos, entre eles⁽⁵⁹⁾:

- Testes de concentrações gravimétricas
- Controle de processo para concentrações gravimétricas
- Teste de aplicabilidade e projeto de separações por densidade
- Testes para determinação de composições em um produto mineral, como o conteúdo de cinza no carvão
- Avaliação da eficiência de outros processos de separação (flotação, eletrodinâmica, classificação mecânica, etc.)
- Concentração da fração secundária de um mineral para estudos mineralógicos detalhados
- Análise da liberação do material
- Análise do produto de indústrias minerais

Apesar das separações de partículas serem geralmente feitas em soluções pesadas ou líquidos pesados, nos quais o controle da densidade pode ser mantido com tranquilidade, algumas separações, particularmente em materiais com tamanhos de partículas grosseiras, podem ser mais convenientemente realizadas com uma suspensão de densidade média⁽⁵⁹⁾.

Ferrara et al.⁽⁶⁰⁾ estudaram a influência da forma das partículas na separação por diferença de densidade para plásticos, pois o processo de cominuição gera partículas de formas variadas que causam dificuldades na separação.

Há três métodos de análise para líquidos densos que são comumente usados:

- **Simple Análise Afunda/Flutua:** Nessa técnica as amostras são sujeitas a uma simples separação afunda/flutua e os dois produtos são pesados e analisados. Esse método é rápido e é na maioria das vezes usado para análises de rotina ou para procedimentos analíticos específicos, onde a vantagem da rapidez tornam-o economicamente atrativo⁽⁵⁹⁾.
- **Completa Análise Afunda/Flutua:** Esse é provavelmente o mais usado dos três métodos de análise. Na prática é idêntico ao método anterior, exceto que múltiplas separações são realizadas em uma extensa faixa de valores de densidade no qual o afundado (ou flutuado) numa certa densidade é colocado em uma densidade maior (ou menor)⁽⁵⁹⁾.
- **Análise por Faixas Densimétricas:** Nessa técnica a amostra é separada em três ou mais frações de densidade através de uma simples operação. Há muitas variações da técnica (usualmente depende do objetivo do pesquisador). Contudo, há somente duas maneiras básicas para realizar tal separação. Uma é o uso de uma coluna na qual a densidade cresce continuamente formando um gradiente do topo até a base. A outra é incrementar zonas de densidade no topo de cada uma. Embora o método tem aplicações especiais e é extremamente útil (particularmente em investigações preliminares) ele requer considerável experiência para produzir bons resultados. É provavelmente mais interessante como ferramenta de pesquisa do que como um meio de produção⁽⁵⁹⁾.

Com relação a densidade de separação, pode-se dividir em três tipos, de acordo com a densidade de corte que se deseja.

- Baixa Densidade de Separação: Adequado para carvão e minerais de baixa densidade, pode ser feito em uma solução de água de sais metálicos como cloreto de zinco (acima de $1,8 \text{ g.cm}^{-3}$). Normalmente os líquidos orgânicos incluem

hidrocarbonetos halogenados e acetona reforçada com Tetrabromoetano (TBE). O uso de tetracloreto de carbono deve ser evitado por ser perigoso a saúde^(50,59,61).

- Média Densidade de Separação: São comumente feitos com TBE (CHBr_2 . CHBr_2 – $2,96 \text{ g.cm}^{-3}$) ou Bromofórmio (CHBr_3 – $2,85 \text{ g.cm}^{-3}$) diluídos com Acetona ($0,79 \text{ g.cm}^{-3}$) para preparar soluções de diferentes densidades. Esse sistema é especialmente usado para separar sulfetos minerais com ganga de silicatos por causa da sua fácil avaliação e custos moderados. Algumas densidades mais altas podem ser obtidas com iodeto de metileno (CH_2I_2 - $3,32 \text{ g.cm}^{-3}$) mas com custos mais altos. A Acetona é usada para diluição e também para remover os orgânicos dos produtos separados. Já que a Acetona é também miscível em água, os líquidos orgânicos podem ser reconcentrados das soluções diluídas por uma simples decantação da água^(50,59,61).
- Alta Densidade de Separação: Uma densidade máxima de $5,0 \text{ g.cm}^{-3}$ (à 95°C) pode ser feita com o uso da solução de Clerici ($\text{CH}_2(\text{COOTI})_2\text{HCOOTI}$) . Essa é uma substância tóxica pela ingestão ou contato com a pele, mas não é difícil trabalhar com ela desde que se tome as precauções necessárias. Para densidades maiores que $5,0 \text{ g.cm}^{-3}$ há duas alternativas. Uma é o líquido de Cargille que são suspensões de metais pesados em uma fase orgânica. Os líquidos de Cargille são usados para incrementos de densidade até $7,5 \text{ g.cm}^{-3}$. Outra alternativa é o uso de emulsão mercúrio-bromofórmio, que tem um máxima densidade de $7,0 \text{ g.cm}^{-3}$ e pode ser usado com sucesso em partículas tão pequenas quanto $0,1\text{mm}$. Separações de substâncias acima de 12 g.cm^{-3} podem ser atingidas pelo uso de magnetos hidrostáticos, isto é, a utilização de uma força suplementar produzida por uma solução de um sal paramagnético quando situado num campo magnético. Esse tipo de separação é aplicada primariamente em minerais não magnéticos com baixo tamanho de partícula, em torno de $50\mu\text{m}$ ^(50,61).

A seguir é apresentada uma tabela com alguns líquidos densos e suas respectivas densidades e também algumas diluições usadas.

Tabela 3 – Tabela de Líquidos Densos e suas densidades empregadas em testes afunda/flutua⁽²⁵⁾.

<i>Líquido Denso</i>	<i>Densidade</i>
H₂O	1,0
NaCl + H₂O	1,2
CaCl₂ + H₂O	1,5
Acetona : TBE = 4 : 5	2,0
Acetona : TBE = 0,27 : 1	2,5
TBE	2,96

2.5.3.2 Suspensões

A separação através de Suspensões foi desenvolvida para beneficiamento de carvões minerais devido a baixa densidade de corte exigida, porém, com a melhoria dos equipamentos, associado ao melhor conhecimento da teoria de separação, esta técnica começou a ser empregada largamente no beneficiamento de outros tipos de minérios e materiais⁽⁶²⁾. Como exemplo disto tem-se o artigo de Buchan⁽⁶³⁾ que estudou a recuperação de plásticos através de técnicas de processamento mineral utilizando suspensões. Uma dificuldade extra encontrada pelo autor é a identificação dos diversos tipos de plásticos existentes.

A separação utilizando suspensões é um processo baseado na diferença de densidades entre dois produtos que se deseja obter, os quais são colocados em um líquido ou polpa com densidade intermediária, sendo que um destes produtos afunda, formando o chamado produto afundado, e outro flutua, o qual é chamado produto flutuado. O exemplo mais típico seria a colocação de ferro e madeira na água. A madeira flutua e o minério de ferro afunda, ocorrendo a separação em dois produtos, o afundado e o flutuado.

A técnica consiste, basicamente, na formação de uma polpa, (mistura de água e um sólido finamente cominuído), com densidade intermediária entre os produtos que se deseja separar. Assim, misturando-se esta polpa com o produto a ser beneficiado, com uma determinada granulometria, obtém-se um produto flutuado de densidade menor do que a da polpa. No caso de carvões, o produto concentrado que se deseja obter se encontra no material flutuado, sendo que o inverso acontece em minérios metálicos, onde o produto a ser

recuperado é o afundado, devido a alta densidade normalmente apresentada pelos minerais metálicos.

Busca-se, basicamente, uma alta precisão de corte, e a utilização de altas taxas de alimentação do carvão, minério ou material, propiciando, com isto, altas recuperações mássicas dos produtos. Devido a utilização de suspensões, estes devem ser facilmente recuperáveis para a sua reutilização no circuito, e possuir baixos custo de aquisição ou produção, para que os custos operacionais do processo como um todo sejam também baixos.

Algumas propriedades inerentes ou não das suspensões influenciam no processo propriamente dito: viscosidade e estabilidade da suspensão, tensão de escoamento e taxa de cisalhamento da suspensão, método e taxa de alimentação, tipo de descarga do equipamento, características físicas e mineralógicas do minério, carvão ou outro material.

O objetivo principal da separação através de suspensão, contudo, é a realização de um corte com alta precisão. Este corte preciso está relacionado com as propriedades hidrodinâmicas do material a ser separado sob condições operacionais, e das propriedades reológicas da suspensão sob estas mesmas condições operacionais, ou seja, a viscosidade efetiva da suspensão que deve ser a menor possível, a tensão de escoamento da suspensão que também deve ser a menor possível, e a estabilidade da suspensão, a qual deve ser a maior possível.

São muitas as qualidades desejáveis para as suspensões utilizadas na indústria. Dentre elas citam-se: estabilidade alta, não serem tóxicas, não serem corrosíveis, não serem deterioráveis, serem miscíveis em água em qualquer proporção para o ajuste da densidade desejada, apresentarem baixa viscosidade, baixo preço e facilidade de se encontrar no mercado.

Um produto apresentando todas estas qualidades, entretanto, não existe, sendo que industrialmente 3 tipos diferentes são utilizados: soluções de sais, meios autógenos e suspensões propriamente ditas.

Sais dissolvidos em água, como por exemplo o cloreto de cálcio, foram utilizados industrialmente em separação de carvões porém, devido aos altos custos, esta operação não é mais realizada, ficando restrita hoje em dia a ensaios laboratoriais.

Meios autógenos são utilizados, atualmente, no processo *Stripa* e nos chamados *water-only-ciclones*, e correspondem a uma mistura de água com o material que se quer concentrar.

Nas suspensões, um sólido finamente cominuído é misturado com água até obter-se uma polpa com uma determinada densidade.

Com o aumento da quantidade de sólidos na polpa a densidade também aumenta, porém com um aumento também da viscosidade aparente. Após uma determinada concentração a viscosidade aumenta, em muito, com um pequeno incremento de sólidos na polpa impossibilitando o seu uso, sendo esta a chamada concentração crítica. A densidade máxima utilizada industrialmente em uma suspensão de sólidos em água é cerca de metade da densidade do sólido.

A granulometria do sólido utilizado na formação de uma suspensão é, também, de vital importância, pois quanto menor a granulometria utilizada mais estável será a suspensão, porém maior também será a viscosidade. Com isto, dependendo do processo utilizado, deve-se utilizar partículas maiores ou menores. Para cada tipo de equipamento ou processo empregado, uma granulometria ótima do sólido que forma a polpa deve ser empregada.

Os materiais apresentados na tabela 4 são normalmente utilizados comercialmente na confecção de suspensões industriais.

Tabela 4 – Principais materiais utilizados em suspensões⁽⁶²⁾.

Material	Densidade do material puro (g.cm⁻³)	Máxima densidade Utilizada (g.cm⁻³)
Ferrosilício (12-15% Si)	6,7	3,8
Galena (PbS)	7,6	3,3
Magnetita (Fe₃O₄)	5,2	2,4
Pirita (FeS₂)	5,2	2,4
Barita (BaSO₄)	4,7	2,0
Areia a base de Quartzo	2,6	1,4

Além da densidade que a polpa pode alcançar, outras propriedades dos materiais a serem utilizados devem ser observadas: Dureza, Corrosão e Regeneração.

Industrialmente a separação com equipamentos que utilizam suspensões pode ocorrer nos chamados separadores estáticos, onde a força de separação do flutuado/afundado dá-se pela ação da força da gravidade. Estes equipamentos são, basicamente, tanques onde são colocados o material e a polpa, ocorrendo, então a separação de um flutuado e um afundado. A separação ocorre, contudo, de uma maneira contínua, ou seja, polpa e material são alimentados e retirados do sistema continuamente. Com isto, muitas vezes, as partículas pequenas, e as partículas com densidade próximas à densidade da polpa, não tem tempo

suficiente de afundarem ou flutuarem pois, devido a viscosidade e a tensão de escoamento do meio, estas se movem lentamente, ou não se movem. Os equipamentos a suspensões estáticos, portanto, são utilizados, preferencialmente, para material com granulometrias maiores.

Uma outra concepção de equipamentos de beneficiamento são os chamados separadores dinâmicos, os quais utilizam a força centrífuga, através do movimento da polpa e material, para que ocorra a separação do flutuado e do afundado mais rapidamente. Em um típico ciclone, a força centrífuga alcança cerca de 20 vezes a força gravitacional. Logicamente a força centrífuga atua, não somente nos produtos a serem separados mas, também, na polpa alterando as propriedades reológicas desta.

A técnica de hidrociclone é usada para separar partículas sólidas de um líquido baseada em diferenças de densidade e dimensões por meio de força centrífuga geradas pelas próprias partículas quando elas giram em círculos. Também é usado para separar contaminantes de líquidos⁽⁵²⁾.

2.5.3.2.1 Separadores Estáticos

Os equipamentos de separação estática possuem, normalmente, recipientes de diversas formas, dentro dos quais são introduzidos a alimentação e o meio denso. O produto flutuado é removido simplesmente por transbordo ou através de pás raspadoras. A remoção do produto afundado já é um pouco mais difícil e exige técnicas mais apuradas no projeto do separador⁽⁶¹⁾. A seguir é descrito um exemplo de separador estático.

(a) Separador Estático Cônico

É um tipo de separador de cone que consiste, essencialmente, de um tanque cônico onde o produto flutuado é descarregado por transbordo. O produto afundado é removido do cone por meio de bomba ou de fluxo ascendente de ar comprimido (*air lift*) que impulsiona para cima o material afundado forçando-o a sair do equipamento⁽⁶¹⁾. Um separador cônico com *air lift* pode ser visto na figura 2.

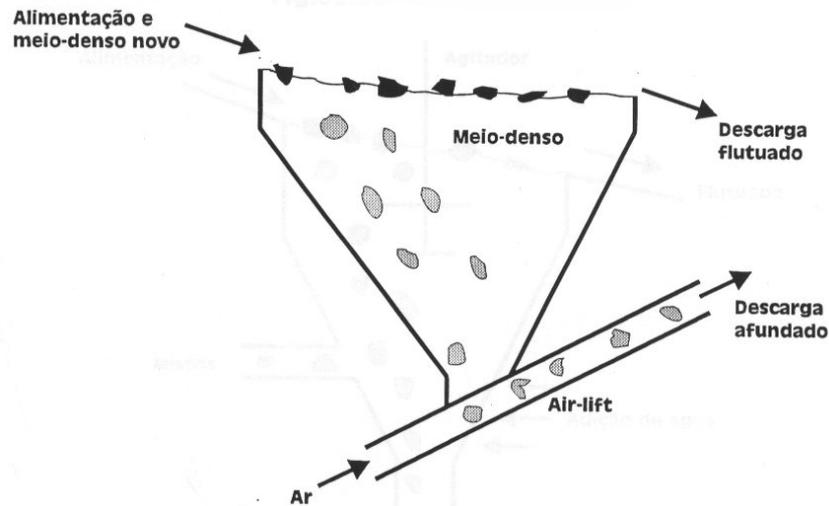


Fig. 2 – Separador estático cônico com descarga tipo air lift⁽⁶²⁾.

2.5.3.2.2 Separadores Dinâmicos

A concepção deste tipo de equipamento foi, primeiramente, estudada na Holanda, na década de 50, utilizando hidrociclones comuns. As enormes forças envolvidas na separação centrífuga permitiram o tratamento de particulado mais fino e densidades de corte maiores, sendo que o tamanho mínimo de partícula a ser beneficiada pode então ser de 0,5mm.

Dentre os equipamentos, os mais utilizados pela indústria são: ciclones, separador Vorsyl, separador Turpinson, separador Dyna-Whirlpool, separador Tri-Flo, e ciclones autógenos.

(a) Ciclones

Um ciclone típico pode ser visto na figura 3. Ele é formado de duas seções justapostas, uma cilíndrica e uma cônica. A alimentação é realizada tangencialmente ao corpo do ciclone e próxima ao topo da seção cilíndrica, formando um intenso fluxo em forma de vórtice.

A alta força centrífuga envolvida possibilita a separação com sucesso, de partículas de granulometrias mais finas, do que por outros métodos gravíticos ficando o minério mais denso próximo à parede, o material menos denso mais próximo do centro do ciclone, e a suspensão entre estes dois produtos⁽⁶¹⁾.

O material mais denso se move, então, ao longo da parede do ciclone e é descarregado no orifício do *underflow*, o chamado *apex*. O material mais leve, que se encontra na parte mais central do ciclone, é apanhado por um fluxo em contracorrente e descarregado pelo orifício de descarga do *overflow*, o *vortex finder*.

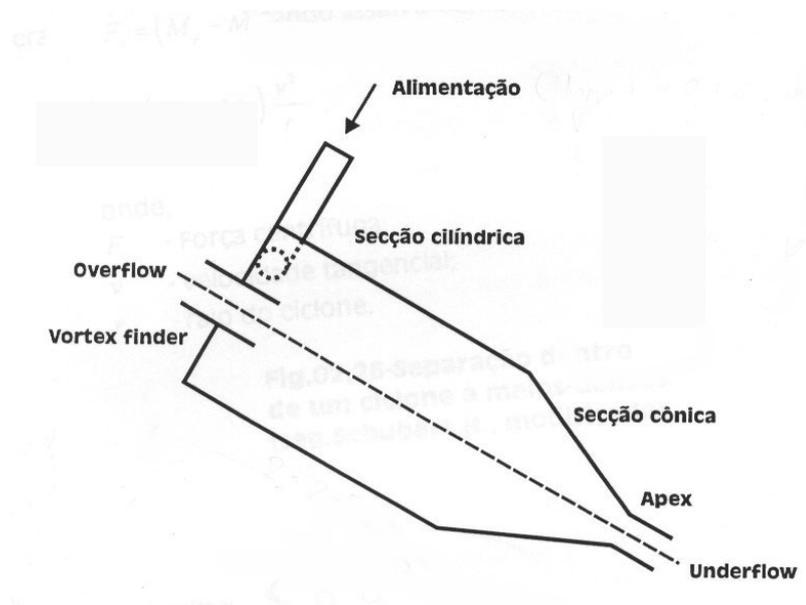


Fig. 3 - Ciclone típico⁽⁶²⁾.

(b) Separador Dyna-Whirlpool

O separador Dyna-Whirlpool foi originalmente desenvolvido para o beneficiamento de minério de chumbo e zinco, porém seu uso atual não mais se restringe a este tipo de minério, sendo utilizado no beneficiamento de diversos outros tipos de minerais e, também, em preparação de carvões.

Seu desenho esquemático pode ser visto na figura 4. O equipamento tem a forma de um cilindro e trabalha inclinado em relação à posição horizontal, 25° para minérios e 15° para carvão⁽⁶¹⁾. A suspensão utilizada é formada ou por magnetita finamente cominuída ou por ferrosilício, dependendo da densidade de corte que se deseja obter.

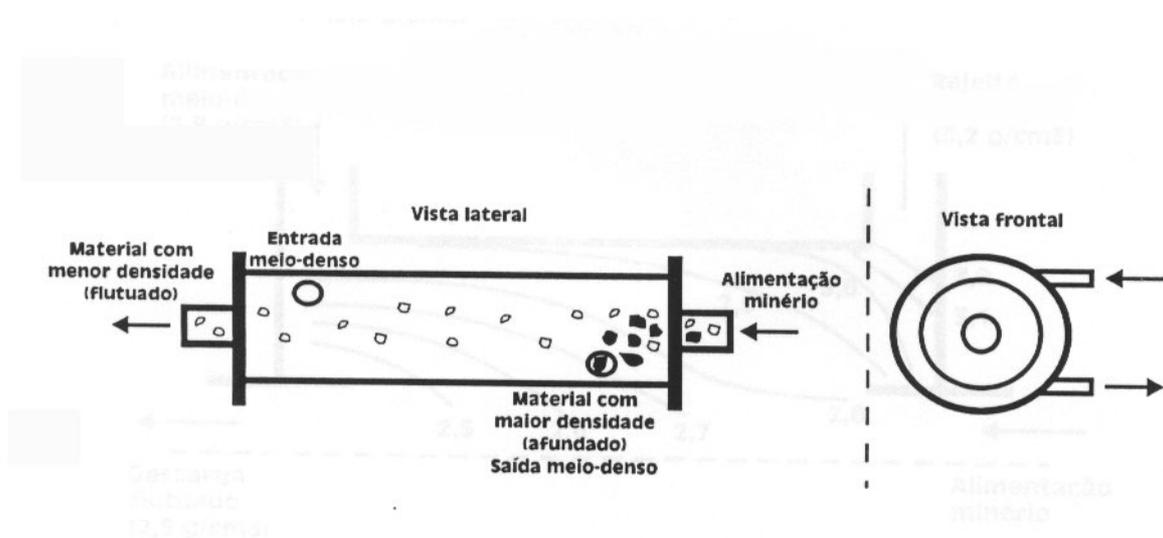


Fig. 4 - Separador Dyna-Whirlpool⁽⁶²⁾.

(c) Separador Tri-Flo

Este separador pode ser considerado como sendo constituído por dois Dyna-Whirlpool acoplados um ao outro em série. Ele é constituído de dois cilindros separadores colocados um ao lado do outro, onde o produto flutuado do primeiro separador torna-se a alimentação do segundo, o qual trabalha com uma densidade de corte menor. Por ser um separador de dois estágios, a separação em três produtos pode ser usada para obtenção de concentrado, misto e rejeito⁽⁶¹⁾.

(d) Ciclones Autógenos

Ciclones autógenos (figura 5), ou *water-only cyclones*, têm sido usados desde a década de cinquenta na separação gravimétrica de minerais. Eles foram incorporados lentamente na indústria devido a sua baixa performance na separação por densidades. Contudo, fatores como seu simples design, o pequeno espaço físico requerido para sua instalação, a baixa manutenção requerida, a utilização de uma polpa formada de água e o mineral que se deseja concentrar, e os seus baixos custos fizeram com que sua utilização fosse bastante propagada.

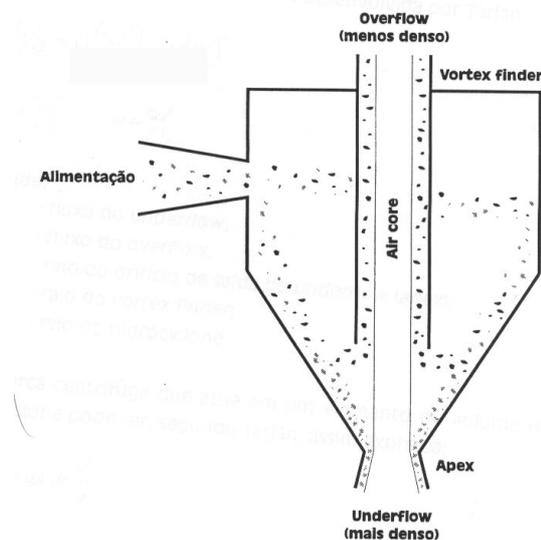


Fig. 5 – Water-only-cyclone⁽⁶²⁾.

2.5.3.3 Jigues

Jigagem é um processo de estratificação de partículas no qual o rearranjo destas resulta de uma expansão e compactação alternada de um leito de partículas por corrente de fluido pulsante. O sentido do fluxo de fluido reverte-se periodicamente. O rearranjo das partículas resultante das distintas velocidades de sedimentação fazem com que a densidade das partículas aumente do topo para o fundo do leito⁽⁶⁴⁾.

Para explicar o fenômeno da estratificação vertical pelo simples movimento de expansão e compactação do leito, existem duas teorias distintas, uma baseada em sedimentação das partículas em fluidos, e outra baseada na variação de energia potencial do sistema, conforme apresentado por Sampaio⁽⁶²⁾.

A utilização racional de um jigue, realizando cortes com a eficiência desejada, depende de diversos fatores, dentre os quais citam-se:

- Características da alimentação: distribuição granulométrica e densimétrica da alimentação.
- Condições operacionais do jigue: propriedades do meio fluido (densidade, viscosidade), velocidade e aceleração do meio, tipo de diagrama de jigagem, altura do leito, quantidade de água de trabalho e transporte, taxa de alimentação.

A distribuição granulométrica e a proporção de finos devem ser mantidas a mais constante possível. O objetivo básico, neste caso, é manter a regulagem do jigue a mais adequada possível a uma determinada distribuição granulométrica de alimentação e manter a contribuição dos finos e ultrafinos à densidade do meio dentro de uma faixa bem estabelecida⁽⁶⁴⁾.

Os Jigues surgiram originalmente para beneficiar minérios mas foram sendo adaptados para outros materiais como mostra o artigo de Jungmann⁽⁶⁵⁾, que estudou a adaptação de Jigues para tratar vários tipos de resíduos, como pedregulhos, solo contaminado, sucata de baterias e outros.

A seguir serão descritos apenas alguns tipos de jigues atualmente utilizados pela indústria.

(a) Jigue Batac de Grosseiros

Um jigue Batac para beneficiamento de material grosseiro pode ser visto na figura 6. O equipamento possui câmaras de ar (“A” na figura) colocadas abaixo do leito do jigue, o qual sustenta o leito de partículas a serem beneficiadas. Através de dutos (“B” na figura) pressão de ar é colocada nesta câmara, fazendo com que o nível de água (“C” na figura) da câmara abaixe. Com o rebaixamento do nível de água dentro da câmara de ar, o nível da água junto ao material levanta e, com isto, ocorre a expansão do leito do particulado. Após certo tempo a pressão de ar dentro da câmara volta a baixar, com conseqüente rebaixamento do nível de água junto ao leito de partículas, ocorrendo a compactação do leito. Assim, com o aumento e diminuição da pressão de ar na câmara é possível expandir-se e compactar-se o leito de partículas conforme diagrama de jigagem pré-determinado.

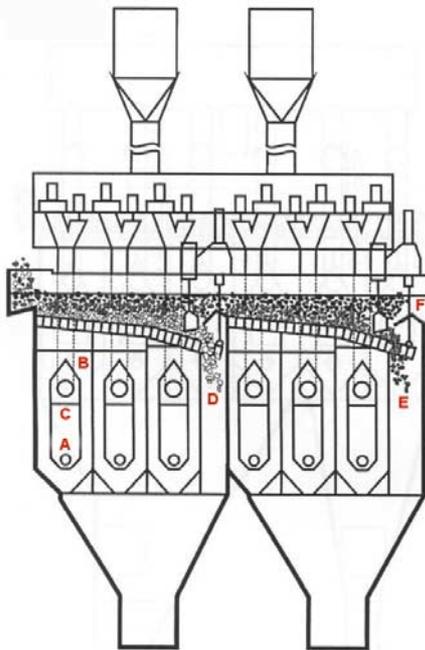


Fig. 6 - Jigue Batac de grosseiros⁽⁶²⁾.

O material mais denso, o particulado misto (densidade intermediária entre o flutuado e o afundado) e o menos denso, então, são removidos do equipamento através de descarregadores:

“D” – material mais denso.

“E” – material misto.

“F” – material menos denso.

(b) Jigues de finos

A figura 7 apresenta esquematicamente um jigue de finos. A expansão e compactação do leito de jigagem ocorre de maneira semelhante ao jigue de grosseiros. A descarga de material fino, contudo, ocorre de maneira diferente.

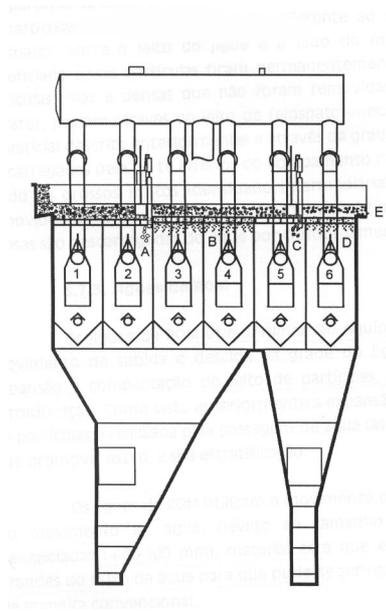


Fig. 7 - Jigue de finos⁽⁶²⁾.

2.5.3.4 Filmes d'Água

O beneficiamento de materiais finos, com granulometrias abaixo de 2mm, muitas vezes é realizado através de processos que utilizam os chamados filmes d'água. Estes processos são assim chamados pois utilizam fluxos de água com pequenas espessuras, geralmente com regime laminar, para realizarem o processo de estratificação densimétrica. Vários tipos ou grupos de equipamentos utilizam este princípio, como por exemplo mesas concentradoras, calhas, espirais, etc.

(a) Mesas Concentradoras

Mesas concentradoras (figura 8) são empregadas a várias décadas, sendo um equipamento disseminado por todo o mundo para a concentração gravítica de minérios e carvão. É considerado de modo geral o equipamento mais eficiente para o tratamento de materiais com granulometria fina⁽⁶⁴⁾.

Elas consistem, essencialmente, de uma superfície plana, chamada de *deck*, com formato, normalmente, romboidal ou retangular, coberta parcialmente por *riffles*. Elas trabalham ligeiramente inclinadas ao longo do eixo horizontal menor, e possuem movimento alternado na direção do eixo maior com diferentes acelerações.

O minério a ser concentrado é alimentado em uma extremidade, sendo estratificado horizontalmente no corpo da mesa, e descarregado na extremidade oposta. A água por sua vez é distribuída ao longo de toda a mesa, na extremidade junto a alimentação do minério, e forma uma película sobre toda a superfície do equipamento. Sua limitação é a baixa capacidade de processamento.

As mesas utilizam dois princípios básicos na estratificação do material:

- Movimento horizontal alternado e assimétrico, formando um ângulo reto com a direção do fluxo da película de água.
- Uso de *riffles* colocados perpendicularmente ao fluxo de água e paralelamente ao movimento da mesa. Estes *riffles* são colocados próximos uns dos outros de modo que ocorra um regime laminar do fluxo de água acima dos *riffles* e turbulento entre eles.

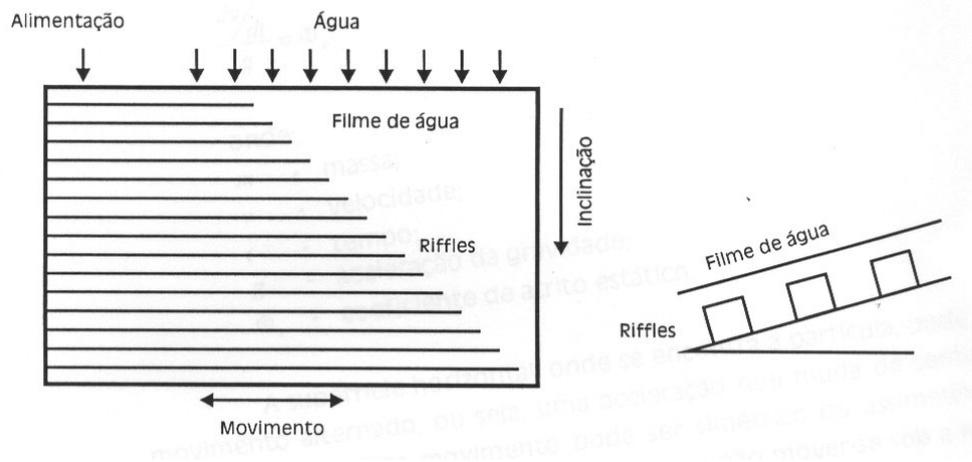


Fig. 8 – Mesa concentradora típica com riffles⁽⁶²⁾.

Distin⁽²⁸⁾ apresenta em seu artigo um estudo para recuperação de metais de sucata eletrônica usando uma mesa concentradora (mesa de Mozley) no processo de separação. A separação gravimétrica do material usando uma mesa de Mozley alcançou uma recuperação de 80 – 84% do cobre.

Existe uma variação dessa técnica de processamento mineral, que é uma adaptação para a reciclagem de plásticos, o que pode ser visto no artigo de Güldenpfennig⁽⁶⁶⁾. Em vez de água se usa ar para a reciclagem de plásticos através de uma mesa pneumática, onde um fluxo de ar separa as partículas de acordo com a sua densidade.

(b) Espirais

As espirais, de um modo geral, têm sido empregadas com relativo sucesso no beneficiamento de frações finas de carvão e também de rejeitos de flotação⁽⁶¹⁾.

As espirais (figura 9) consistem, basicamente, de uma calha em forma de helicóide ou espiral, a qual separa partículas leves e pesadas em diferentes fluxos de polpa que são removidos em separado.

O minério, sob a forma de polpa, é alimentado na espiral por intermédio de um caixa de alimentação, a qual é colocada acima do equipamento. A polpa flui ao longo do eixo da espiral e ocorre, então, estratificação em um plano vertical. As partículas pesadas seguem para as zonas de mais baixas velocidades (mais próximas ao eixo central da espiral), enquanto que as mais leves tendem a se concentrar em zonas de mais altas velocidades (mais afastadas do eixo central).

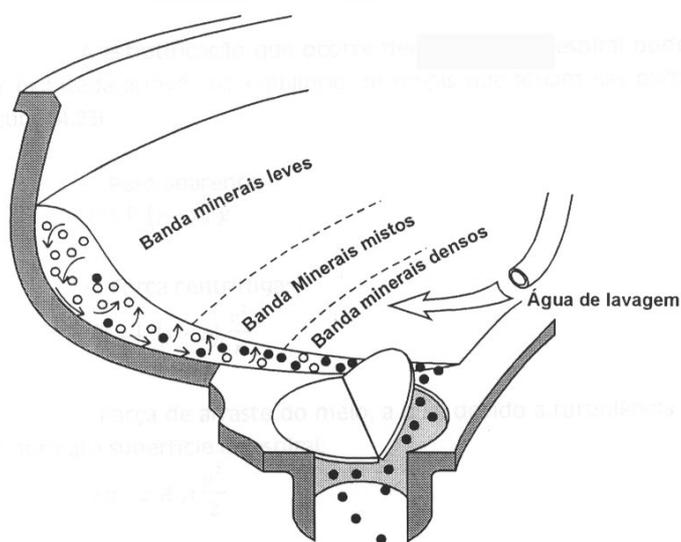


Fig. 9 - Fluxos secundários dentro de uma espiral⁽⁶²⁾.

Até recentemente o desenho das espirais era basicamente o mesmo das espirais desenvolvidas na década de quarenta. Hoje em dia, contudo, existem diversos tipos e fabricantes de espirais, que apresentam variados raios, perfis, passos, capacidade, material de fabricação, tipo de descarga, etc.

2.5.4 SEPARAÇÃO MAGNÉTICA

Todos os materiais são afetados de alguma maneira pela presença de um campo magnético. Para objetivos práticos os materiais tratados em processos de seleção de partículas magnéticas, que baseiam-se no movimento diferencial de materiais em campo magnético, podem ser divididos em duas grande categorias⁽²⁴⁾:

(a) Materiais Diamagnéticos, que são repelidos por um campo magnético e que se movem para posições de mais baixa intensidade de campo.

(b) Materiais Paramagnéticos, que são atraídos por um campo magnético e que se movem para posições de mais alta intensidade de campo.

Ferro, Ferri e Antiferromagnetismo podem, para os objetivos dessa discussão, serem considerados como casos especiais de paramagnetismo.

A magnitude de interação de um material com um campo magnético é freqüentemente descrita em termos de suscetibilidade magnética X , onde $X = M / H$; sendo M a intensidade de magnetização do material e H o campo magnético aplicado. A intensidade do campo, B , dentro de um material sujeito a um campo magnético é dado pela expressão⁽²⁴⁾:

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (\text{Tesla})$$

Onde μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo.

Em materiais diamagnéticos e paramagnéticos as relações entre M e H são aproximadamente lineares, isto é, X é constante para um dado material.

Materiais diamagnéticos têm um valor negativo muito pequeno de X , materiais paramagnéticos têm pequena suscetibilidade positiva e materiais ferromagnéticos têm um grande valor mas variável, dependendo do campo magnético aplicado e da prévia história magnética da amostra.

As propriedades magnéticas de um material são dependentes tanto da estrutura eletrônica dos elementos presentes quanto do arranjo dos átomos no sólido. Essas propriedades magnéticas são conhecidas como propriedades extensivas isto é, elas dependem diretamente de quão cada material está presente. As propriedades de partículas compostas entretanto, dependem do volume fracional de várias fases nas partículas. Os tamanhos, formas e distribuição dos grãos dentro das partículas tem somente uma pequena função na determinação do comportamento desses materiais compostos em um campo magnético.

Em resumo, as características magnéticas do material dependem criticamente de diferentes fatores como⁽²⁴⁾:

- dos elementos presentes, seus estados de ionização e suas concentrações no sólido.
- da estrutura cristalina do sólido.
- no caso de ferro e ferrimagnéticos, da história anterior do material.

Processos de separação magnética podem ser convencionalmente divididos em alta ($>100 \text{ A.m}^{-1}$) e baixa ($<10 \text{ A.m}^{-1}$) intensidade de processo. Baixas intensidades de campo podem ser usadas para selecionar materiais que tenham alta mobilidade magnética de um outro material que tenha baixa suscetibilidade (ex. Fe_3O_4 de SiO_2). Os componentes ferromagnéticos de resíduos podem ser separados diretamente do resíduo via uma forte região magnética que remove os materiais magnéticos do fluxo.

Um cinturão magnético consiste de uma correia transportadora em volta de um magneto permanente. Os materiais magnéticos são atraídos pelo magneto contra a correia transportadora. A correia transporta o material para fora do campo magnético onde ele se desprende da correia⁽⁵²⁾.

Processos com alta intensidade são usados para separar materiais fracamente paramagnéticos (baixo X) de partículas presentes em processos a base de um fluxo.

Essa técnica pode ser usada para separar materiais paramagnéticos de materiais não magnéticos diretamente do resíduo através de um forte campo magnético com alto gradiente⁽⁵²⁾.

Alguns equipamentos de separação magnética e suas características estão resumidos na tabela 5.

Tabela 5 – Alguns equipamentos de separação magnética e suas características⁽²⁴⁾.

Equipamento	Alimentação	Tamanho partícula (mm)	Campo (A.m^{-1})	Gradiente (Tesla.m^{-1})
Magnetos	Seca	5 – 300	6	5
Tambor	Úmida/Seca	10^{-1} – 10	6	5
Correia	Seca	10^{-1} – 10	1 – 15	1 – 10
Carrossel	Úmida	10^{-2} – 10^{-1}	250	2000

Uma planta para separação de materiais ferrosos de lixo urbano foi construída na Inglaterra, usando três estágios de separação magnética com correias⁽⁵⁵⁾

2.5.5 SEPARAÇÃO A BASE DE PROPRIEDADES ELÉTRICAS

A seleção de partículas sólidas de uma mistura pode ser feita utilizando as forças que atuam nas partículas carregadas ou polarizadas em um campo elétrico. Já que cada material tem suas próprias características elétricas isso resulta em movimentos diferentes das partículas no campo e sua subsequente seleção dentro de diferentes processos a base de um fluxo⁽²⁴⁾.

Há três mecanismos importantes pelo qual as partículas podem adquirir uma carga superficial.

- Contato Elétrico
- Indução de Condutividade
- Bombardeamento de Íons

Tem sido observado que quando dois materiais diferentes em contato um com o outro são movidos aparte, uma troca de carga acontece, provavelmente pela transferência de elétrons. Repetidos contatos de partículas que são pobres condutoras elétricas resulta na construção de uma carga “estática”. Apesar de comumente observado, o contato elétrico é difícil de controlar por causa da variabilidade de propriedade dos materiais.

O mecanismo de indução de condutividade é mais claramente entendido. Se uma partícula sólida é colocada em um grande rotor (figura 10) na presença de um campo elétrico, a partícula irá desenvolver uma carga superficial por indução. Partículas condutoras irão, num curto espaço de tempo, assumir o grande potencial do rotor, que é oposto ao do eletrodo sem descarga. As forças eletrostáticas nas partículas condutoras irão atraí-los em direção ao eletrodo. Partículas não condutoras que são incapazes de adquirir carga do rotor permanecem polarizadas e são atraídas pelo rotor ou passam através do campo relativamente intactas. Um adequado separador colocado entre os dois processos irá separá-las.

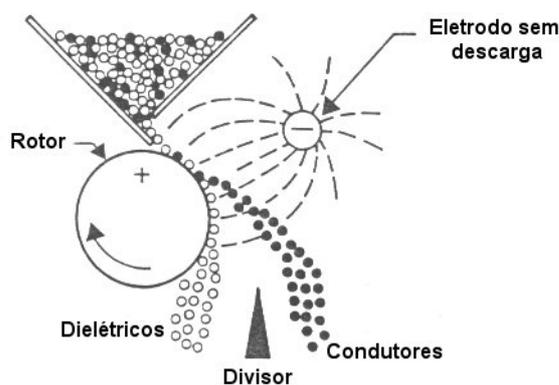


Fig. 10 – Separação de materiais por indução de condutividade⁽²⁴⁾.

Na indução de condutividade nenhuma corrente elétrica passa entre o eletrodo e o rotor; já em bombardeamento por íons usando um eletrodo com descarga ocorre uma transferência de carga entre os dois locais. Pela aplicação de uma diferença de voltagem muito alta entre o eletrodo e o rotor, átomos carregados ou moléculas podem ser gerados no gás. As partículas passam então através desse fluxo de íons que movem-se entre os eletrodos, e as cargas são bombardeadas na superfície das partículas.

A força atrativa entre as partículas carregadas e o rotor resulta que essas partículas permanecem com o rotor. A diferença no caminho feito pelas partículas torna a separação possível.

Além desses mecanismos, existe a técnica chamada de contra corrente, em que pelo uso da condutividade dos materiais, materiais ferrosos e não-ferrosos podem ser separados ou materiais não-ferrosos podem ser removidos⁽⁵²⁾.

Trazendo uma partícula condutora para dentro de um campo magnético flutuante, uma contra corrente é gerada na partícula.

A força atuante na contra corrente pela variação do campo magnético é usada para separar as partículas. Partículas condutoras são desviadas enquanto partículas não condutoras não são desviadas, deste modo uma separação é obtida.

A condutividade elétrica de um material está diretamente ligada ao tipo de ligação e as forças de ligação entre os átomos de um cristal. Cuidado deve ser tomado para distinguir entre materiais metálicos e materiais contendo metais; são casos bem diferentes. Uma das propriedades usadas para caracterizar um material metálico é a alta condutividade elétrica, isto é, resistividade na ordem de $10^{-8} - 10^{-6}$ ohm.m. Esses materiais podem ser considerados como um arranjo ordenado de um átomo metálico no núcleo carregado positivamente envolto

por uma nuvem de elétrons. Já que os elétrons externos dos átomos não estão associados com qualquer átomo particular, eles são relativamente livres para se mover através da estrutura e conseqüentemente transferir cargas elétricas.

Em contraste, numa estrutura com ligação covalente (ex. SiO_2) a maioria dos elétrons estão constringidos para mover-se dentro de uma certa órbita eletrônica. Essa órbita forma ligações altamente direcionais com elétrons de átomos vizinhos. Em qualquer temperatura há uma probabilidade finita que os elétrons possam vencer essas restrições e mover-se livremente dentro do sólido. Já que essa probabilidade é baixa a baixas temperaturas e baixas voltagens aplicadas, o número de elétrons que são capazes de levar carga é também baixo e então, isso resulta, na baixa condutividade elétrica do material.

Utilizando essas características dos materiais, vários estudos são feitos baseados em separação por propriedades elétricas. Fears⁽⁶⁷⁾ em seu artigo trata da separação de não-ferrosos provenientes do resíduo de um incinerador municipal. Utilizando a cinza de fundo resultante da incineração ele aplicou alguns processamentos para recuperar esses materiais, entre eles os metais não-ferrosos, que foram separados utilizando-se das suas propriedades elétricas. Fletcher et al.⁽⁶⁸⁾ também utilizaram propriedades elétricas para separar cobre e latão de isolantes. Esse trabalho já tinha sido feito para a recuperação do alumínio e agora o autor expandiu para o cobre e o latão. Além desses, Buch et al.⁽⁶⁹⁾ estudaram a aplicação de propriedades elétricas na separação de metais não-ferrosos. São descritos os estudos quanto aos ajustes no aparelho e ao tamanho e forma das partículas a fim de melhorar os resultados de separação. Zhang et al.⁽⁴⁾ apresentam em seu artigo uma investigação do efeito da variação da forma das partículas resultante do processo de cominuição nos resultados de separação a base de propriedades elétricas.

2.6 CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS E SUCATAS

A utilização de resíduos ou sucatas como matéria-prima para um outro processo é governado por leis específicas de cada país⁽⁷⁰⁾. Primeiramente estes resíduos ou sucatas devem ser caracterizados através das propriedades físico-químicas e também pela avaliação da periculosidade destes.

No Brasil a avaliação de periculosidade deve ser feita de acordo com as Normas NBR 10004, 10005 e 10006^(71, 72, 73).

A Periculosidade de um resíduo é caracterizada em função das suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas que pode oferecer:

- a) risco à saúde pública, provocando ou acentuando, de forma significativa, um aumento de mortalidade ou incidência de doenças;
- b) riscos ao meio ambiente, quando o resíduo é manuseado ou destinado de forma inadequada.

e também se apresentar uma das seguintes características:

- a) inflamabilidade: resíduos que podem inflamar sob certas condições ou que são espontaneamente inflamáveis.
- b) corrosividade: resíduos corrosivos são ácidos ou bases que são capazes de corroer metais.
- c) reatividade: resíduos reativos são instáveis sob condições “normais”. Eles podem causar explosões, fumaças tóxicas, gases ou vapores quando misturados com água.
- d) patogenicidade: resíduo patogênico é aquele que contém microorganismos ou suas toxinas capazes de produzir doenças.
- e) toxicidade: resíduos tóxicos são prejudiciais ou fatais quando ingeridos ou absorvidos. Quando resíduos tóxicos são dispostos no solo, pode ocorrer lixiviação e poluir a água. A toxicidade é definida através de ensaios em laboratório conforme Normas da ABNT NBR 10005 e 10006, Lixiviação de Resíduos e Solubilização de Resíduos, respectivamente. A partir dos ensaios são identificadas as concentrações máximas dos contaminantes no lixiviado, acima da qual são prejudiciais a saúde humana e ao meio ambiente^(68,74).

Com relação à toxicidade, os resíduos são classificados no Brasil em três diferentes classes: Classe I (Perigosos), Classe II (Não – Inertes) e Classe III (Inertes)

- Classe I: são os resíduos sólidos ou misturas de resíduos que apresentam risco à saúde pública e/ou apresentam efeito adverso sobre pessoas, animais e plantas, e ao meio ambiente. Os resíduos que submetidos ao teste de lixiviação conforme a NBR 10005 apresentarem teores de poluentes no extrato lixiviado em concentração superior aos padrões constantes da listagem 7 da NBR 10004, são classificados como classe I (perigosos).
- Classe II: são resíduos não-inertes, que não se enquadram na classe I, mas também não são completamente inertes.
- Classe III: são os resíduos que submetidos ao teste de solubilização (NBR 10006) não tenham nenhum dos constituintes solubilizados em concentração superior aos padrões na listagem de “Padrões para o Teste de Solubilização” da NBR 10004.

O limite máximo de concentração de alguns elementos constantes da listagem 7 da NBR 10004 estão na tabela 6. Os elementos constantes nesta tabela são aqueles que podem estar presentes em Placas de Circuito Impresso.

Tabela 6 – Lista 7 da NBR 10004 - Concentração Máxima (mg.L⁻¹) no Ensaio de Lixiviação⁽⁷¹⁾.

Elemento	Concentração Máx. (mg.L⁻¹)	Elemento	Concentração Máx. (mg.L⁻¹)
Arsênio	5,0	Cromo	5,0
Bário	100,0	Mercúrio	0,1
Cádmio	0,5	Prata	5,0
Chumbo	5,0	Selênio	1,0

Para que processos de reciclagem possam ser empregados é importante que as propriedades químicas e físicas de resíduos e sucatas sejam conhecidas.

As propriedades químicas que normalmente caracterizam um material é a composição química. As propriedades físicas são, entre outras, a granulometria, permeabilidade, densidade, porosidade, umidade, heterogeneidade e textura.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

3.1.1 PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

As Placas de Circuito Impresso usadas neste trabalho são provenientes de Computadores Pessoais (PCs) e foram coletadas em empresas que trabalham com manutenção de microcomputadores. São placas obsoletas ou então defeituosas.

Para a realização de todo o trabalho foram utilizados aproximadamente 10Kg de Placas de Circuito Impressa provenientes de computadores pessoais dos mais variados tipos e idades dos equipamentos.

A figura 11 abaixo mostra uma PCI antes de qualquer processamento. As partes reutilizáveis ou que contenham substâncias tóxicas (baterias, capacitores, etc.) foram retiradas manualmente.

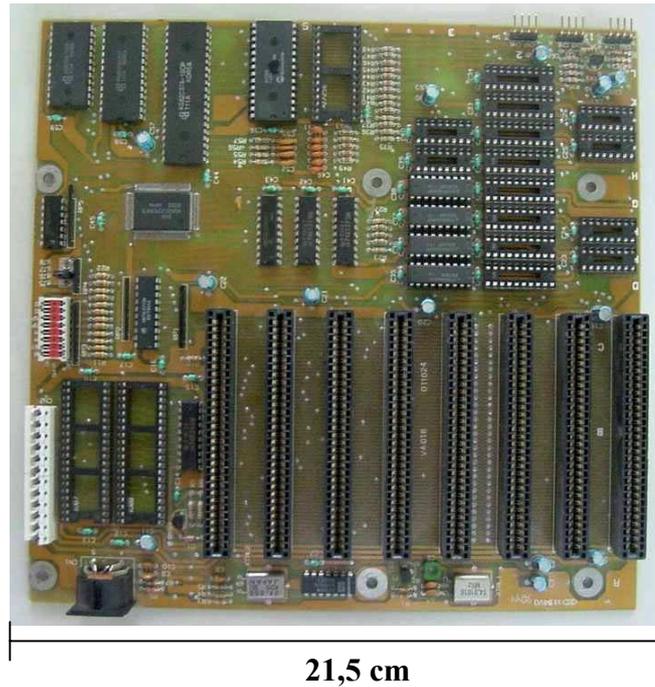


Fig. 11 – Placa de Circuito Impresso no estado original.

As PCI são formadas de uma maneira geral pelo substrato e pelos componentes. Neste trabalho utilizam-se então 3 (três) “tipos” de sucatas:

- PCI (a placa completa, ou seja, o substrato mais os componentes)
- CE (somente os componentes)
- SP (somente os substratos)

Os componentes são soldados ao substrato através de uma liga Pb-Sn (37 – 63%) que tem um baixo ponto de fusão ($\sim 183^{\circ}\text{C}$), então quando toda a placa é aquecida, a solda funde e os componentes são retirados facilmente, enquanto a maior parte da solda permanece junto ao substrato.

3.1.2 SOLUÇÕES

Neste trabalho foram usadas diversas soluções químicas que estão especificadas abaixo dando detalhes sobre onde foram usadas e demais características.

- a) TBE: Tetrabromoetano ($\text{CHBr}_2 \cdot \text{CHBr}_2$) líquido orgânico utilizado na etapa de separação por densidade
Marca: Nuclear
Densidade: $2,96 \text{ g.cm}^{-3}$
Pureza: 97 - 100%

- b) Acetona: [$(\text{CH}_3)_2\text{CO}$] solvente usado na diluição do TBE para baixar a densidade de corte na etapa de separação por densidade.
Marca: Synth
Densidade: $0,79 \text{ g.cm}^{-3}$
Pureza: 99,5%

- c) Ácido Nítrico: (HNO_3) reagente usado na formulação da água-régia e na análise química do estanho.
Marca: Reagen
Pureza: 65%

- d) Ácido Clorídrico: (HCl) reagente usado na formulação da água-régia e na análise química do estanho.
Marca: Nuclear
Pureza: 37%

- e) Ácido Acético: (CH_3COOH) reagente usado no controle do pH dos extratos lixiviados durante o ensaio de lixiviação.
Marca: Nuclear
Pureza: 99,5 – 100%

- f) Ácido Sulfúrico: (H_2SO_4) usado nas análises químicas do cobre e do alumínio.
Marca: Nuclear
Pureza: 95 – 98%
- g) Ácido Ascórbico: ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$) usado na análise química do alumínio.
Marca: Synth
Pureza: 99%
- h) EDTA: ($\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{Na}_2\text{O}_8 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) usado na análise química do alumínio.
Marca: Merck
Pureza: 99%
- i) Hidróxido de Sódio: (NaOH) usado na análise química do alumínio e do níquel.
Marca: ABC
Pureza: 93%
- j) Cloridrato de Hidroxilamina: ($\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$) usado na análise química do cobre, do ferro e do níquel.
Marca: Nuclear
Pureza: 96%
- k) Citrato de Sódio: ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) usado na análise química do cobre.
Marca: Synth
Pureza: 99%
- l) Hidróxido de Amônia: (NH_4OH) usado na análise química do cobre e do estanho.
Marca: Synth
Pureza: 28 – 30%
- m) Neocuproína: ($\text{C}_{16}\text{H}_{12}\text{N}_2$) usado na análise química do cobre.
Marca: Vetec
Pureza: 99%

- n) Clorofórmio: (CH_3Cl) usado na análise química do cobre e do níquel.
Marca: Nuclear
Pureza: 99,8%
- o) Etanol: ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) usado na análise química do cobre.
Marca: Synth
Pureza: 95%
- p) Acetato de Amônia: ($\text{NH}_4\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$) usado na análise química do ferro.
Marca: Nuclear
Pureza: 100%
- q) Acetato de Sódio: ($\text{NaC}_2\text{H}_3\text{O}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) usado na análise química do ferro e do níquel.
Marca: Nuclear
Pureza: 99 – 100%
- r) 1,10 – Fenantrolina Monohidratada: ($\text{C}_{12}\text{H}_9\text{N}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) usado na análise química do ferro.
Marca: Merck
Pureza: 99,5%
- s) Dimetilglioxina: ($(\text{CH}_3)_2 \cdot \text{C}_2 \cdot (\text{NOH})_2$) usado na análise química do níquel.
Marca: Reagen
Pureza: 100%
- t) Ácido Cítrico: ($\text{H}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$) usado na análise química do níquel.
Marca: Reagen
Pureza: 99%
- u) Ácido Tartárico: (CHOHCO_2H)₂ usado na análise química do níquel.
Marca: Grupo Química
Pureza: 99,5%

v) Cianeto de Potássio: (KCN) usado na análise química do zinco.

Marca: Nuclear

Pureza: 96%

w) Metanol: (CH₃OH) usado na análise química do zinco.

Marca: Synth

Pureza: 99,8%

x) Tartarato de Sódio: (Na₂C₄H₄O₆ . 2H₂O) usado na análise química do níquel.

Marca: Vetec

Pureza: 99,5%

y) Tiosulfato de Sódio: (Na₂S₂O₃ . 5H₂O) usado na análise química do níquel.

Marca: Vetec

Pureza: 99%

3.1.3 EQUIPAMENTOS

Diferentes equipamentos foram utilizados, tanto nas etapas de separação de metais como em etapas de caracterização:

a) Moinho de Facas marca Rone modelo SRB 2305 com motor Trifásico: Usado na cominuição grosseira das Placas de Circuito Impresso.

Número de Facas: 3

Dimensão das Facas: 20cm x 6cm x 1,2cm

Potência: 5cv

b) Moinho de Facas marca Marconi modelo MA340: Usado na cominuição fina das Placas de Circuito Impresso.

Número de Facas: 4

Dimensão das Facas: 8cm x 3cm x 0,6cm

Potência: 1cv

- c) Conjunto de Peneiras marca Retsch modelo AS200 digit: Usado na classificação granulométrica das Placas de Circuito Impresso
Peneiras: 1,0 mm (16 mesh); 0,5 mm (32 mesh); 0,25 mm (60 mesh).
- d) Agitador de Wagner marca Marconi: Usado para ensaios de lixiviação.
Capacidade: 8 frascos de 2000 mL
- e) Aquecedor marca Ética: usado para retirar os componentes soldados ao substrato.
Potência: 1500 watts
- f) Funil de Separação marca Schott Duran: usado na separação por densidade.
Capacidade: 500 mL
- g) Espectrofotômetro de Emissão marca Jasco modelo UV/VIS Spectrophotometer 7800: usado nas análises químicas.
- h) Balança marca Chyo modelo JK – 200
Capacidade: 200g
Leitura: 0,1mg

3.2 MÉTODOS

Neste trabalho o processamento das Placas de Circuito Impresso envolveu várias etapas a fim de recuperar os metais presentes e também caracterizar esse resíduo quanto a sua periculosidade. O fluxograma abaixo mostra um esquema de todo o processo.

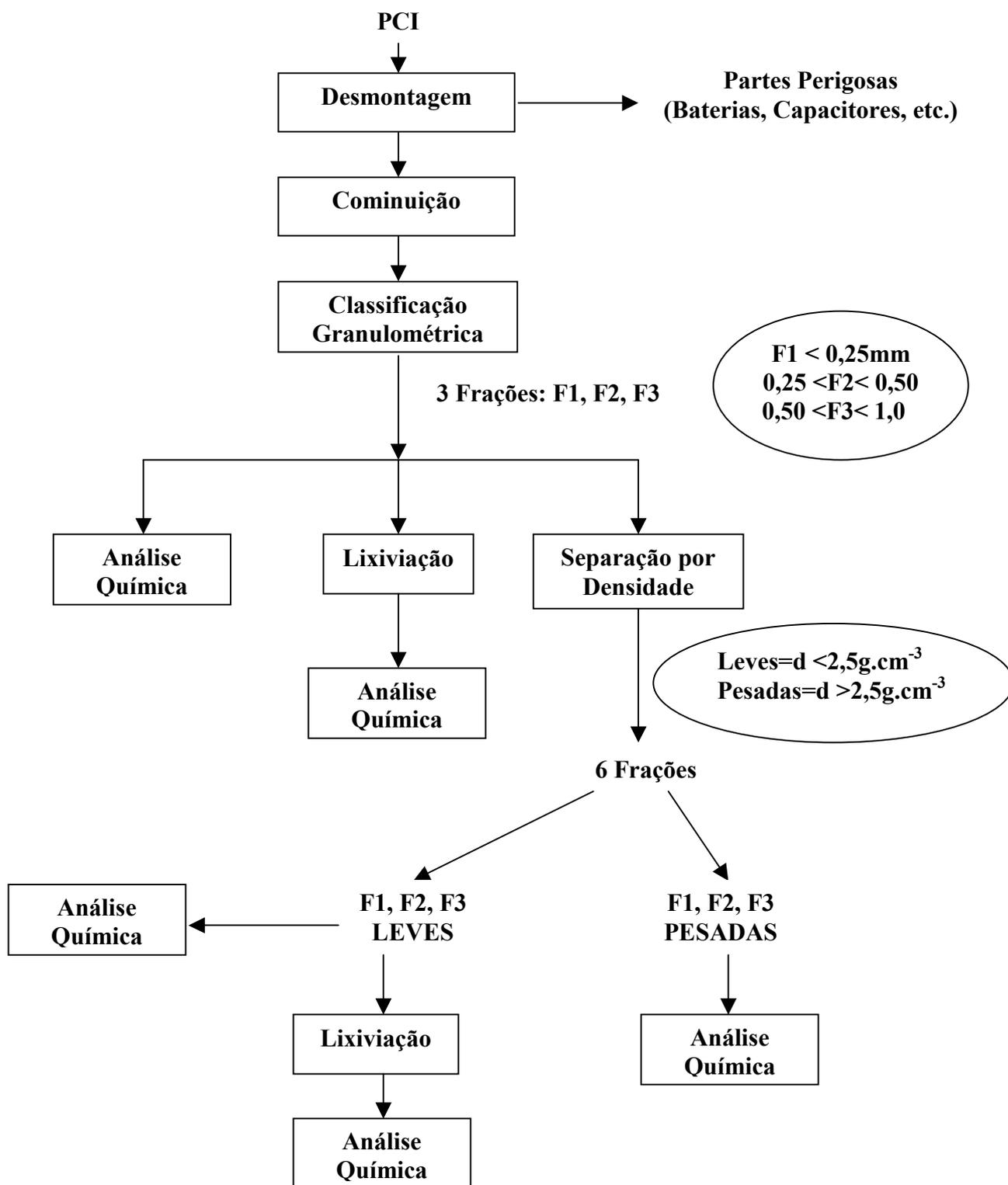


Fig. 12 – Fluxograma das etapas do processo.

As etapas apresentadas na figura 12 foram realizadas para as placas de circuito impresso (PCI) completas. Além disso, um processo de separação de componentes foi realizado e as mesmas etapas foram repetidas só para os componentes (CE) e só para o substrato (SP).

Para fazer a separação dos componentes as Placas de Circuito Impresso foram colocadas sobre uma chapa aquecedora usada em laboratório químico, deixando a face das placas que contém os pontos de solda em contato com a chapa aquecida por aproximadamente 2 minutos. A solda se funde permitindo que os componentes sejam retirados com a ajuda de ferramentas (alicate e chave de fenda).

3.2.1 COMINUIÇÃO

O primeiro passo na recuperação de metais das placas de circuito impresso é a cominuição, onde os três tipos de sucatas (PCI, CE e SP) passaram por uma redução de tamanho em moinhos de facas. Foram usados 2 moinhos de facas. O primeiro, mostrado na figura 13 abaixo possui dimensões maiores e faz um quebrantamento preliminar. Após é necessário passar o resíduo por um segundo moinho de dimensões menores a fim de que todas as partículas fiquem com uma granulometria menor que 1mm. O segundo moinho está mostrado na figura 14.



Fig. 13 – Moinho de Facas marca Rone



Fig. 14 – Moinho de Facas marca Marconi

A cada moagem realizada foi processado em torno de 1kg de placas de circuito impresso.

3.2.2 CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA

Após os resíduos terem sido moídos eles foram classificados granulometricamente através de um conjunto de peneiras, mostrado na figura 15. O resíduo (cerca de 400g de cada vez) era colocado na peneira superior e deixava-se agitar por cerca de 1 hora. Foram usadas três peneiras, sendo a superior de 16 mesh (1mm), a intermediária de 32 mesh (0,5mm) e a inferior de 60 mesh (0,25mm).

O material que após o peneiramento permanecia na peneira superior (> 1 mm) era moído novamente num moinho de menor dimensão (Moinho Marconi) até que toda a sucata ficasse menor que 1 mm.

Após o peneiramento obtém-se então três frações distintas que chamamos de:

- F_1 : granulometria $< 0,25\text{mm}$, ($F_1 < 0,25$).
- F_2 : granulometria entre $0,25$ e $0,5\text{mm}$, ($0,25 < F_2 < 0,5$).
- F_3 : granulometria entre $0,5$ e $1,0\text{mm}$, ($0,5 < F_3 < 1,0$).

O processo de peneiramento foi realizado tanto para PCI como para CE e SP.



Fig. 15 – Conjunto de Peneiras marca Retsch

3.2.3 SEPARAÇÃO POR DENSIDADE

Após as placas terem sido moídas e separadas granulometricamente, foi feita uma separação por densidade utilizando líquidos orgânicos. Essa escolha se deve ao fato de que em laboratório é mais simples trabalhar com líquidos orgânicos. O líquido utilizado foi o

Tetrabromoetano (TBE) por apresentar menor custo e também por ser o mais acessível no mercado.

O TBE tem uma densidade relativa de $2,96 \text{ g.cm}^{-3}$ e pode ser diluído com Acetona $[(\text{CH}_3)_2\text{CO}]$. A densidade de trabalho escolhida foi de $2,5 \text{ g.cm}^{-3}$ por apresentar uma menor viscosidade, tornando assim o processo de separação mais rápido e também o processo de limpeza do TBE através de filtragem mais eficiente e rápido. Para diminuir a densidade de $2,96$ para $2,5 \text{ g.cm}^{-3}$ foi usado Acetona na proporção de $1:0,27^{(25)}$.

O TBE já com a densidade de trabalho de $2,5 \text{ g.cm}^{-3}$ foi então colocado em um funil de separação com capacidade de 500 mL, como mostrado na figura 16 e após foi adicionado 20 gramas do resíduo. Após 2 horas em média a separação estava completa, ou seja, a parte pesada (metais) afundava e a parte leve (polímeros e cerâmicas) flutuava.

A separação da parte pesada e da parte leve foi feita utilizando uma malha de aço com uma abertura de $0,15\text{mm}$ que era colocada na saída do funil de separação e que permitia a passagem do TBE mas retinha o material sólido, primeiramente da fração pesada e em outra etapa da fração leve.



Fig. 16 – Funil usado para Separação por Densidade.

Após cada separação realizada o TBE era reaproveitado através de filtração, utilizando papel de filtro (0,007g) e uma bomba de vácuo.

Na tabela 7 pode-se ver a densidade dos diferentes materiais que compunham as PCI, prevendo-se qual afunda e qual flutua numa densidade de corte de 2,5 g.cm⁻³.

Tabela 7 - Densidade de materiais presentes nas PCI (g.cm⁻³)⁽⁷⁵⁾.

Material	Densidade (g.cm⁻³)	Material	Densidade (g.cm⁻³)
Ouro	19,3	Alumina	3,99
Chumbo	11,3	Alumínio	2,7
Prata	10,5	Vidro	2,24
Cobre	8,9	Teflon	2,2
Níquel	8,9	Magnésio	1,7
Ferro	7,9	PVC	1,7
Estanho	7,31	Sílica	1,7 – 2,2
Zinco	7,14	Policarbonatos	1,2

3.2.4 LIXIVIAÇÃO

O ensaio de lixiviação baseia-se no princípio de que não existe material completamente insolúvel, ou seja, quando se coloca um material sólido em contato com um líquido, alguns constituintes se dissolvem e permanecerão assim no lixiviado. A concentração desse constituinte no lixiviado é usado para classificar o resíduo como perigoso ou não.

No processo de reciclagem de PCI foram feitos ensaios de lixiviação em dois momentos. Primeiramente o ensaio foi realizado com amostras do material que tinha sido cominuído e classificado granulometricamente.

O ensaio baseado na NBR 10005 consiste basicamente em colocar uma amostra com 100 gramas de material sólido com granulometria menor que 9,5 mm em um frasco de 2 litros em contato com 1600 ml de água deionizada. O frasco é submetido a uma agitação de 24 horas. O

pH é ajustado no valor 5 com ácido acético 0,5N, nos tempos de 15, 30 e 60 minutos, contados a partir do final da etapa anterior.

Através deste ensaio foi possível classificar a periculosidade das PCI, CE e SP de acordo com a norma NBR 10005.

Num segundo momento foram feitos ensaios de lixiviação na fração leve proveniente da separação por densidade para classificar esse “novo” resíduo de acordo com a NBR 10005.

O equipamento utilizado está mostrado na figura 17 abaixo.

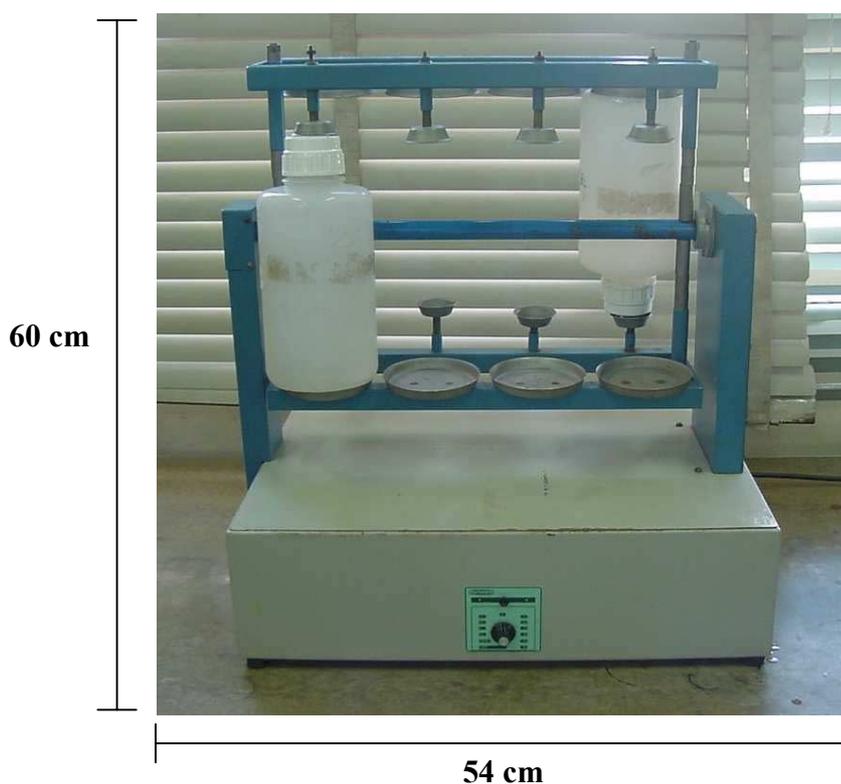


Fig. 17 – Agitador de Wagner para Ensaio de Lixiviação marca Marconi.

3.2.5 ANÁLISE QUÍMICA

As análises químicas foram feitas utilizando três métodos: Absorção Atômica, Titulação⁽⁷⁶⁾ e Espectrofotometria de Emissão⁽⁷⁷⁾. Essa variação de método ocorre devido ao elemento analisado e também ao limite de detecção de cada método.

Foram feitas análises químicas em três momentos do processo. A primeira após as sucatas cominuídas terem sido classificadas granulometricamente, a fim de determinar os

metais presentes, sua quantidade e se havia alguma tendência de concentrar metais em uma das frações apenas pelo processo de cominuição.

A segunda bateria de análises químicas foi feita após a separação por densidade, determinando assim quais metais realmente se concentraram na fração pesada e quais na fração leve, assim como suas quantidades.

O terceiro momento, foi fazer as análises dos lixiviados, primeiramente das frações cominuídas para poder fazer sua classificação quanto a periculosidade e depois das frações leves provenientes da separação por densidade, para verificar se houve diminuição na quantidade de metais ou se houve alteração quanto a sua classificação de toxicidade.

Em todas as análises, com exceção dos extratos lixiviados, o procedimento de preparação das amostras foi o mesmo: pesava-se em média 2,0 gramas de amostra e colocava-se água régia (3 HCl : 1 HNO₃), aquecia-se até o ponto de ebulição e em cerca de 10 minutos toda a fração metálica estava digerida. Filtrava-se e então fazia-se diluições de acordo com o elemento a ser analisado e o método de análise empregado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

Antes de qualquer processamento das Placas de Circuito Impresso foi necessário fazer uma análise química preliminar para conhecer melhor o material que se pretendia estudar. Uma moagem preliminar foi realizada e o produto da moagem foi separado em três frações granulométricas. Uma análise mais completa foi feita na fração de menor granulometria (F1). Para as outras frações foram analisados apenas os elementos de maior interesse comercial e que estavam presentes em maior quantidade na fração F1. Essa análise (tabela 8) mostra a grande quantidade de elementos presentes nas Placas de Circuito Impresso o que indica uma grande dificuldade na reciclagem destas sucatas, mas também mostra o grande percentual de metais valiosos que devem ser recuperados.

Tabela 8 – Composição química das Placas de Circuito Impresso.

Elemento	Concentração (% em peso)		
	F1 (F< 0,25mm)	F2 (0,25<F<0,5)	F3 (0,5<F<1,0)
Alumínio	2,26	Não determinado	Não determinado
Antimônio	0,13	Não determinado	Não determinado
Bário	0,35	Não determinado	Não determinado
Berílio	ND	Não determinado	Não determinado
Bromo	4,6	Não determinado	Não determinado
Cálcio	5,94	Não determinado	Não determinado
Carbono	21,15	Não determinado	Não determinado
Chumbo	4,54	Não determinado	Não determinado
Cloro	0,17	Não determinado	Não determinado
Cobre	4,49	7,95	8,10
Cromo	0,03	Não determinado	Não determinado
Escândio	0,0005	Não determinado	Não determinado
Estanho	6,35	4,5	6,02
Estrôncio	0,0501	Não determinado	Não determinado
Ferro	1,055	Não determinado	Não determinado
Fósforo	2,4	Não determinado	Não determinado
Ítrio	0,0011	Não determinado	Não determinado
Magnésio	1,4	0,8	0,62
Níquel	0,252	0,98	2,73
Ouro	0,0453	Não determinado	Não determinado
Paládio	0,0015	Não determinado	Não determinado
Potássio	0,15	Não determinado	Não determinado
Prata	0,247	0,1	0,05
Silício	11,68	Não determinado	Não determinado
Sódio	0,18	Não determinado	Não determinado
Titânio	0,605	Não determinado	Não determinado
Vanádio	0,0028	Não determinado	Não determinado
Zinco	0,038	Não determinado	Não determinado
Zircônio	0,101	Não determinado	Não determinado
TOTAL	68,57		

Como se pode ver na tabela 8, a quantidade de elementos presentes nas Placas de Circuito Impresso é extremamente grande.

Deve-se dar destaque para o Alumínio, Bromo, Cálcio, Carbono, Chumbo, Cobre, Estanho, Ferro, Fósforo, Magnésio, Níquel e Silício, todos com teores acima de 1% em alguma das frações analisadas.

Mas também deve-se notar a presença do ouro, prata e paládio, metais valiosos que são objeto de muitos estudos de recuperação em sucatas eletrônicas.

Comparando-se os dados de análise química das Placas de Circuito Impresso (tabela 8) com os dados da literatura (tabela 2), pode-se ver que estão na mesma ordem de grandeza e que elementos como chumbo e estanho estão presentes em concentrações maiores nas Placas de Circuito Impresso estudadas nesse trabalho, ou seja, há uma maior quantidade de solda.

Essa variação depende da origem da PCI e da idade do equipamento. Isso também se aplica ao cobre e ao ouro que apresentam uma concentração maior do que a indicada na literatura.

Como pode ser visto ver na tabela 8, a soma dos teores de todos os elementos analisados não alcançou 100%, isso se deve a presença de outros elementos que não foram analisados e também da presença de hidrocarbonetos e de oxigênio dos óxidos.

4.2 COMINUIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA

O resultado da primeira cominuição de placas de circuito impresso completas feita num moinho de grandes dimensões marca Rone está mostrado na figura 18.

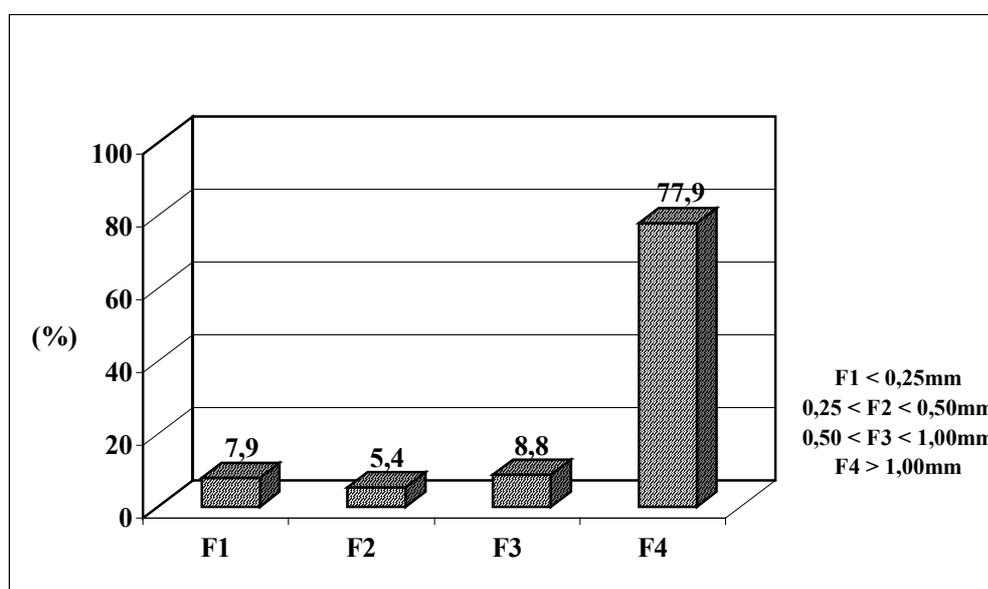


Fig. 18 – Resultado da cominuição no moinho marca Rone para PCI.

Os resultados da primeira cominuição mostrados na figura 18 indicam que a grande parte do material cominuído se concentra na fração 4 ($> 1\text{mm}$) a de maior granulometria e uma pequena parcela do material se dividiu entre as outras 3 frações.

Segundo Zhang⁽⁴⁾ é fácil obter a liberação dos compostos presentes em sucatas eletrônicas devido a baixa ligação interfacial dos materiais usados em equipamentos eletrônicos. Basicamente os materiais são atachados por fixação, inserção, soldagem e empacotamento. Por isso a energia para liberar os materiais associados como cerâmicas, vidros e metais, tendo propriedades mecânicas distintas, não é muito intensa.

Zhang⁽²⁵⁾ também mostra que após uma moagem secundária em um moinho de escala laboratorial o grau de liberação completa, principalmente para o cobre, pode ser alcançado para frações menores que 2 mm.

Para garantir a eficiência do processo trabalha-se com uma granulometria abaixo de 1mm. O moinho marca Rone utilizado primeiramente não tinha condições de deixar toda a massa cominuída abaixo de 1mm, então foi necessário utilizar outro moinho de menores dimensões, o moinho Marconi, para transformar toda a fração 4 ($> 1\text{mm}$) em uma das outras 3 frações, garantindo assim que todo o material cominuído estivesse com uma granulometria inferior a 1mm.

A segunda cominuição transformou totalmente a fração com granulometria maior que 1mm para uma granulometria abaixo de 1mm, e após esta fração foi classificada em uma das outras 3 frações.

Esse resultado está mostrado nas figuras 19 (para PCI), 20 (para CE) e 21 (para SP), onde pode-se ver que a massa originada da fração 4 ($> 1\text{mm}$) que foi novamente cominuída se concentrou principalmente nas frações mais grosseiras (F3), demonstrando a mesma tendência da primeira cominuição, ou seja, o material se concentra nas frações mais grosseiras.

Toda a classificação granulométrica foi feita com um conjunto de 3 peneiras (16, 32 e 60 mesh) resultando nas 3 frações de trabalho.

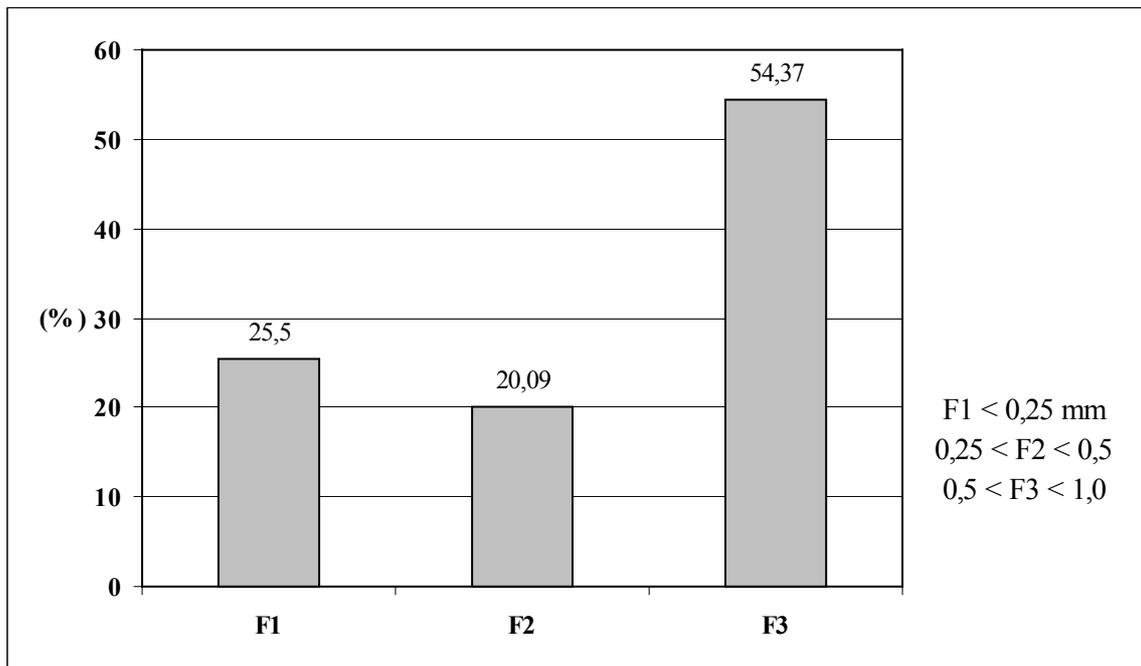


Fig. 19 – Resultado da cominuição da fração 4 (> 1mm) no moinho Marconi para PCI.

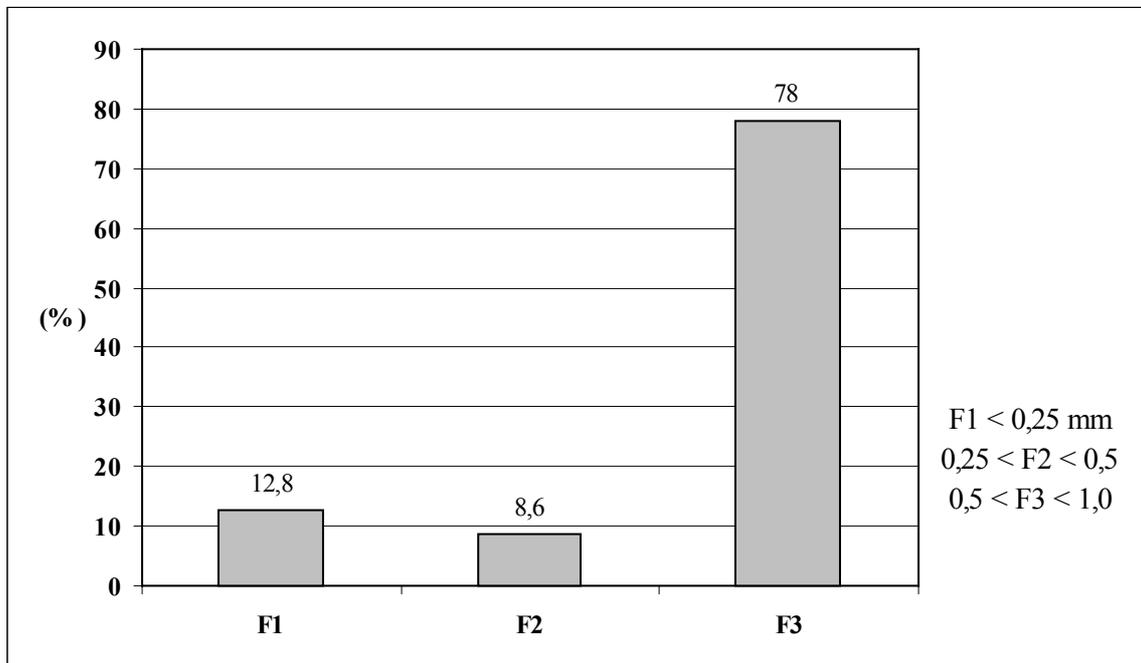


Fig. 20 – Resultado da cominuição na fração 4 (> 1mm) no moinho Marconi para CE.

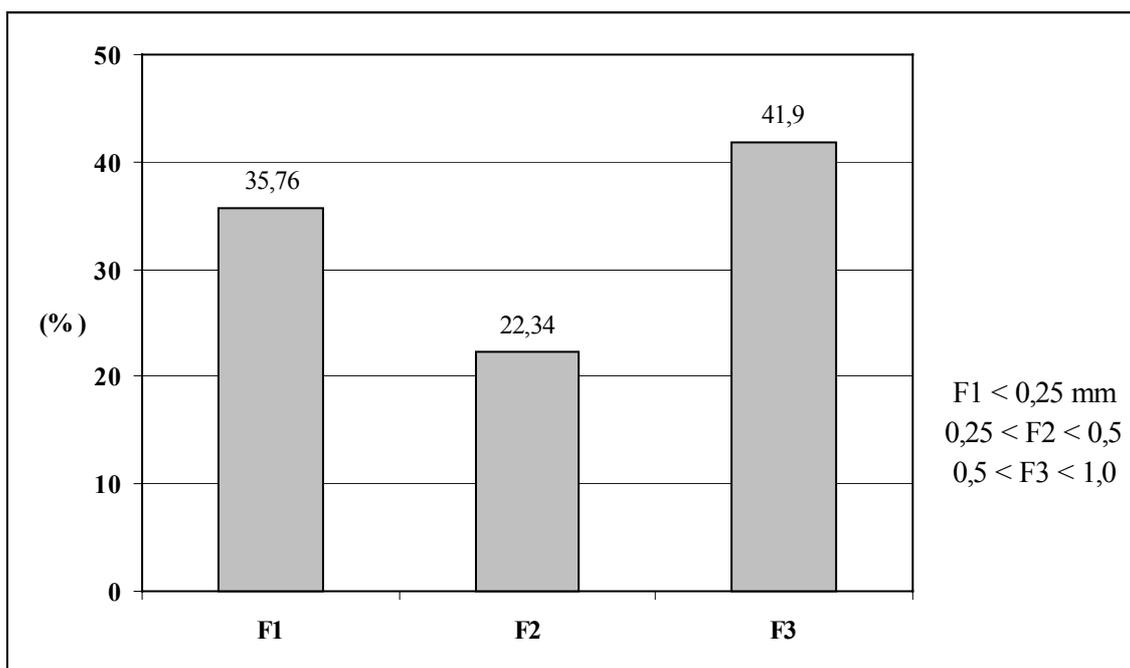


Fig. 21 – Resultado da cominuição na fração 4 (> 1mm) no moinho Marconi para SP.

O processo de cominuição das Placas de Circuito Impresso realizado em dois moinhos diferentes mostra que, devido a presença de metais, as Placas de Circuito Impresso são materiais de difícil cominuição. Zhang⁽⁴⁾ diz que moinhos que fazem uso de impacto, como os moinhos de martelo, podem “empacotar” as partículas de metais liberados, particularmente o alumínio, na forma de bolas. Por essa razão, os moinhos de martelo não são recomendados para o primeiro estágio de cominuição de sucatas eletrônicas. Em vez disso, um moinho de facas pode ser usado para esse objetivo, o que foi usado no presente trabalho.

Após ter todo o resíduo com uma granulometria abaixo de 1mm e classificado em apenas três frações granulométricas pode-se inferir, através de uma digestão com água-régia, qual a percentagem de metal e não-metal que existe em cada fração de PCI, CE e SP.

4.2.1 PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO (PCI)

Na figura 22 pode-se ver qual a percentagem de Metal e Não-Metal encontrada em PCI (que contém tanto o substrato como os componentes). Foi considerado como parte metálica a massa que foi digerida com água-régia (em ebulição) em aproximadamente 15 minutos.

A massa não digerida foi filtrada e considerada como Não-Metal.

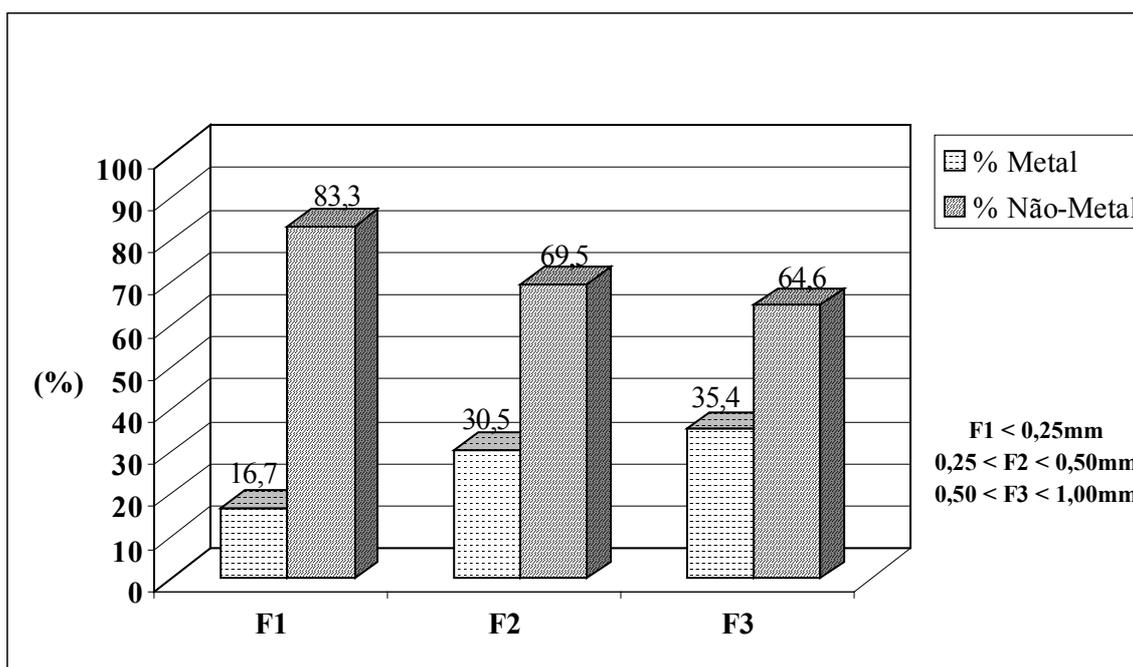


Fig. 22 – Percentagem de metal e não-metal nas frações de PCI separadas granulometricamente após moagem em moinho marca Marconi.

A figura 22 mostra que a percentagem de metal aumenta conforme aumenta a granulometria alcançando cerca de 35% de metais na fração 3.

Com as frações metálicas de PCI, digeridas com água-régia, foram feitas análises químicas que estão mostradas na tabela 9.

Tabela 9 – Análise química das frações metálicas de PCI após separação granulométrica.

PCI			
(%)	F1	F2	F3
Cobre	6,28	23,53	24,34
Zinco	0,05	0,08	0,23
Ferro	0,13	0,13	0,18
Alumínio	3,01	1,55	1,56
Níquel	0,05	0,20	0,20
Chumbo	0,35	0,95	1,35
Estanho	2,51	2,50	2,51

Com relação aos metais é interessante fazer uma comparação entre a quantidade de cada metal encontrado em Placas de Circuito Impresso de acordo com as análises químicas das tabelas 8 e 9 e a quantidade do mesmo metal encontrado originalmente nos minérios. Essa comparação está mostrada na tabela 10. A percentagem média para cada elemento em PCI foi obtida através de uma média aritmética de todas as frações das duas tabelas.

Tabela 10 – Percentagem de metal encontrado em média nos minérios e nas Placas de Circuito Impresso^(78, 79, 80).

Elemento	% no Minério	% média na PCI
Cobre	0,5 – 3,0	12,5
Zinco	1,7 – 6,4	0,08
Estanho	0,2 – 0,85	4,0
Chumbo	0,3 – 7,5	2,7
Ferro	30 – 60	0,6
Níquel	0,7 – 2,0	0,7

Fazendo agora um gráfico somente para o Cobre (figura 23), que é o metal de maior interesse neste trabalho, pode-se ver que sua quantidade também aumenta conforme aumenta a granulometria.

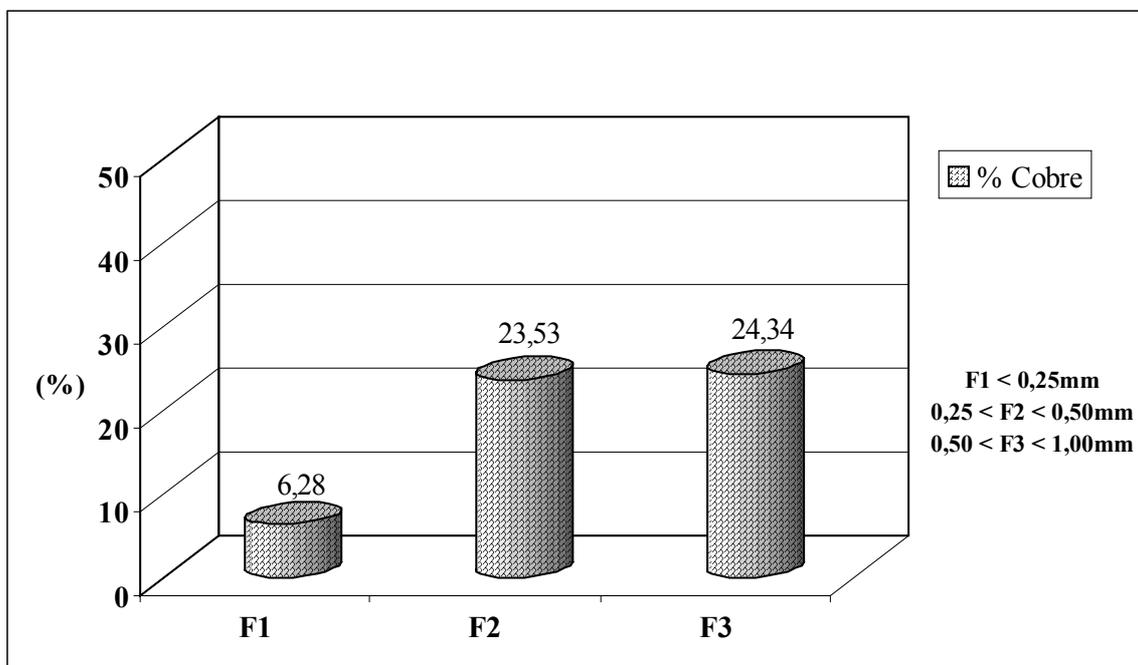


Fig. 23 – Percentagem de Cobre nas frações de PCI após separação granulométrica.

4.2.2 COMPONENTES ELETRÔNICOS (CE)

Na figura 24 pode-se ver a percentagem de Metal e Não-Metal para CE (somente os componentes eletrônicos das placas). O procedimento para obtenção dos valores de Metal e Não-Metal foram os mesmos seguidos anteriormente para PCI.

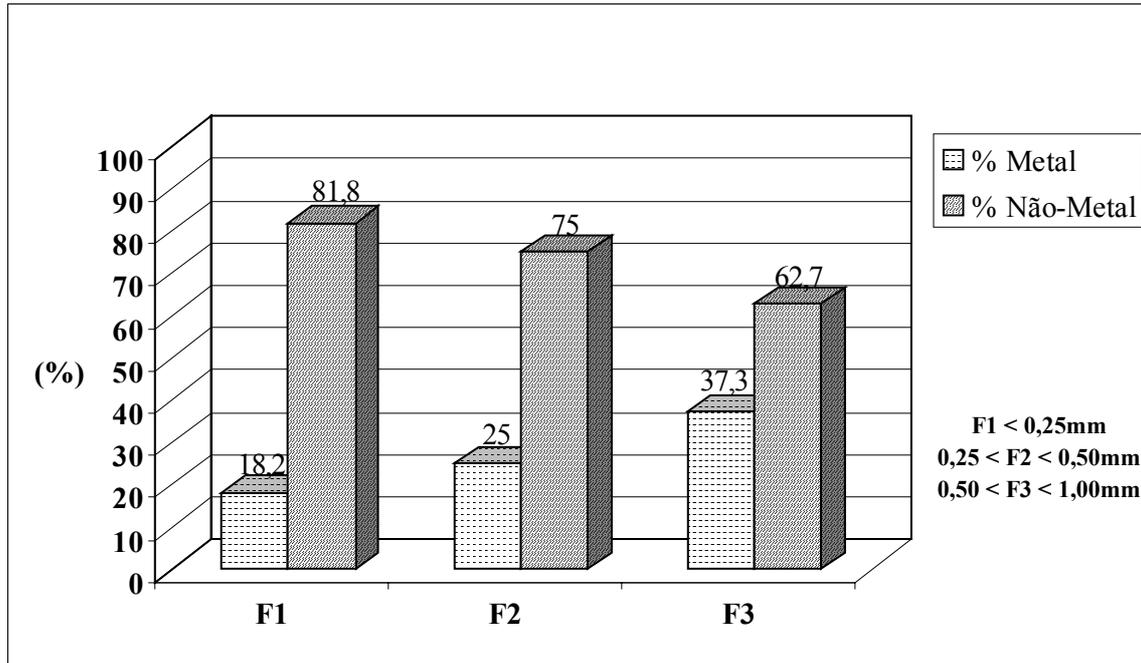


Fig. 24 – Percentagem de metal e não-metal nas frações de CE separadas granulometricamente após moagem em moinho marca Marconi.

Neste gráfico também pode-se ver que a percentagem de metal aumenta conforme aumenta a granulometria alcançando cerca de 37% de metais na fração 3.

A tabela 11 mostra as análises químicas feitas nas frações metálicas de CE.

Tabela 11 – Análise química das frações metálicas de CE após separação granulométrica.

CE			
(%)	F1	F2	F3
Cobre	9,68	17,25	30,15
Zinco	0,38	0,19	0,66
Ferro	0,28	0,10	0,08
Alumínio	2,06	1,62	0,92
Níquel	0,40	0,31	0,60
Chumbo	2,34	3,18	2,78
Estanho	3,83	4,78	4,92

A figura 25 mostra a quantidade apenas de Cobre para CE após separação granulométrica. Pode-se ver que a quantidade também aumenta com o aumento da granulometria.

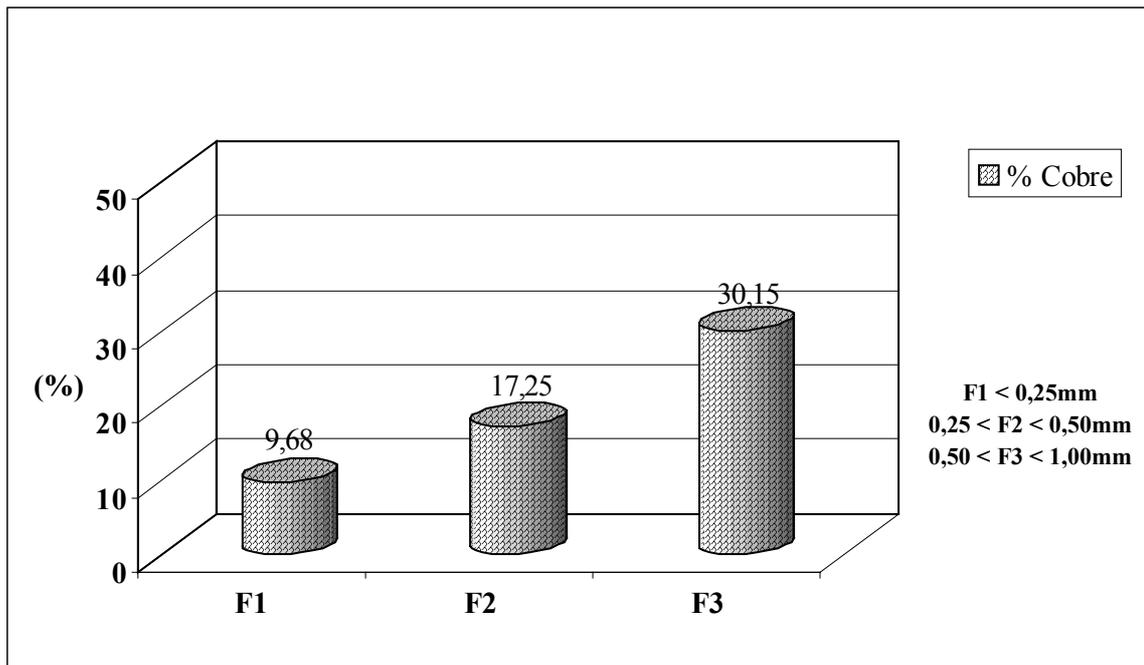


Fig. 25 – Percentagem de Cobre nas frações de CE após separação granulométrica.

4.2.3 SUBSTRATO (SP)

Na figura 26 agora tem-se a percentagem de Metal e Não-Metal para SP (somente os substratos das placas).

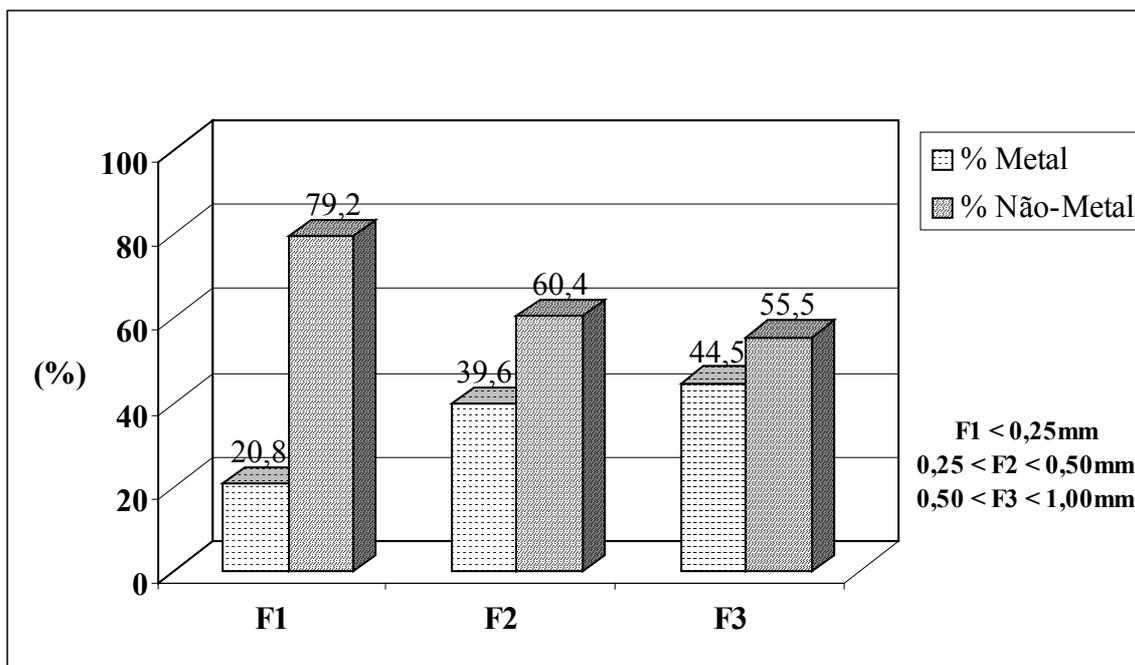


Fig. 26 – Percentagem de metal e não-metal nas frações de SP separadas granulometricamente após moagem em moinho marca Marconi.

Seguindo os mesmos procedimentos anteriores pode-se ver que a maior percentagem de metais está na fração 3 com cerca de 45%.

A análise química das frações metálicas de SP estão mostradas na tabela 12.

Tabela 12 – Análise química das frações metálicas de SP após separação granulométrica.

SP			
(%)	F1	F2	F3
Cobre	7,43	15,34	28,40
Zinco	0,017	0,017	0,052
Ferro	0,525	0,320	1,538
Alumínio	2,34	2,10	0,45
Níquel	0,22	0,35	0,41
Chumbo	1,01	1,27	2,3
Estanho	1,06	1,46	9,15

A figura 27 mostra a quantidade de Cobre para SP após a separação granulométrica. Pode-se ver que a quantidade de Cobre também aumenta conforme aumenta a granulometria.

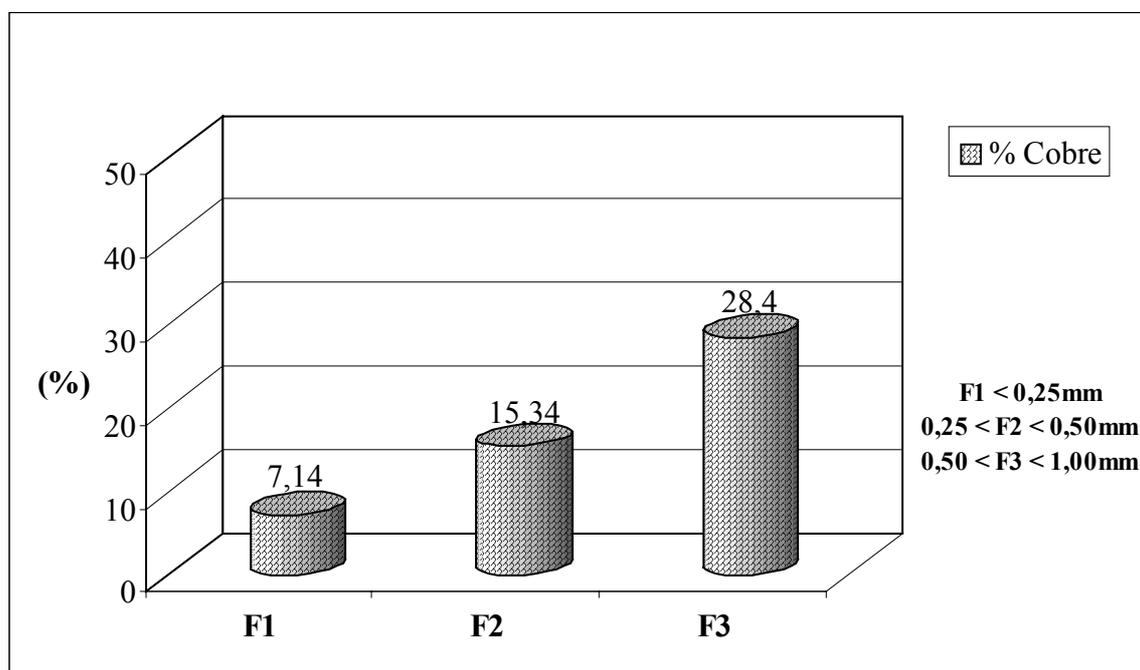


Fig. 27 – Percentagem de Cobre nas frações de SP após separação granulométrica.

4.2.4 CONCENTRAÇÃO DE METAIS EM FUNÇÃO DA GRANULOMETRIA

Considerando-se os resultados gerais obtidos na moagem e separação granulométrica pode-se observar que já foi possível obter um concentrado de metais

Para as placas completas (PCI) o resultado está na figura 22 e mostra que a fração fina (F1) possui bem menos metal que a fração mais grossa (F3). Essa tendência também acontece para os componentes eletrônicos (CE), figura 24, e para os substratos (SP), figura 26. Essa tendência se deve principalmente ao fato de que moer materiais dúcteis é mais difícil que moer materiais frágeis. Como a maioria dos metais é menos frágil que alguns polímeros e cerâmicos, os metais acabam se concentrando na fração de maior granulometria. Para os três tipos de sucatas (PCI, CE e SP) os substratos (SP) foram os que mais concentraram metais, em torno de 44% na fração 3 (figura 26), já as placas completas (PCI) concentraram aproximadamente 35% de metais na fração mais grosseira (figura 22).

Com os resultados da análise química dos principais elementos nas 3 frações granulométricas (tabela 9 (para PCI), na tabela 11 (para CE) e na tabela 12 (para SP)) pode-se

observar que o cobre é o elemento principal, mas que o Alumínio, o Chumbo e o Estanho também estão presentes com quantidades consideráveis.

Com exceção do Alumínio, todos os outros elementos seguem a tendência verificada anteriormente, ou seja, estão mais concentrados na fração 3 (mais grosseira). Grande parte do alumínio presente está na forma de alumina, um cerâmico, que é mais frágil e conseqüentemente mais fácil de moer, se concentrando nas frações mais finas.

É importante notar a quantidade de cobre que se concentra, principalmente na fração 3, de todos os três tipos de sucatas, chegando a alcançar 30% nos componentes eletrônicos (CE), figura 25. Para chumbo e estanho esta tendência de concentração nas frações mais grosseiras não é tão clara. Considerando-se que estes metais estão presentes principalmente em função da solda utilizada, o nível de liberação destes metais deve ser menor e eles devem estar principalmente ligados a elementos das frações mais finas.

De tudo isso que foi mostrado até agora, o mais importante é dizer que com uma simples moagem seguido de uma classificação granulométrica alcançam-se no mínimo uma concentração de 35% de metais nas frações grosseiras, sendo que dessa parte metálica, no mínimo 25% é cobre, 2,5% é estanho e 1,35% é chumbo.

Sabendo-se que as fontes naturais desses metais alcançam em média 1% de metal e que 60% do custo para extração do minério é devido a lavra pode-se dizer que o custo de extração e concentração para a produção primária é provavelmente muito maior do que o custo para o tratamento das sucatas de Placas de Circuito Impresso, ou seja, estas sucatas são no mínimo uma fonte de matéria prima muito interessante.

4.3 SEPARAÇÃO POR DENSIDADE

A próxima etapa do processo foi o uso de líquidos densos para fazer uma separação por densidade dos materiais provenientes da etapa anterior.

Sabe-se que separação com líquidos densos é a mais precisa aproximação das técnicas utilizadas para caracterizar a separação por densidade de minerais e serve para uma grande variedade de objetivos, mesmo sabendo que alguns líquidos densos são caros e perigosos⁽²⁵⁾.

Como já foi citado, o líquido escolhido foi o TBE (Tetrabromoetano) e a densidade de corte escolhida foi de $2,5 \text{ g.cm}^{-3}$. Através de um funil de separação com capacidade de 500mL foi então realizada a separação.

Os resultados para a separação por densidade também estão divididos em função do tipo de sucata analisada (PCI, CE ou SP).

4.3.1 SEPARAÇÃO POR DENSIDADE PARA PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO (PCI)

O primeiro resultado apresentado está mostrado na figura 28 e corresponde a percentagem de material que afunda e que flutua quando colocamos 20g do resíduo (PCI) dentro do funil de separação com o líquido de densidade intermediária (TBE). O ensaio foi feito para as 3 diferentes frações granulométricas.

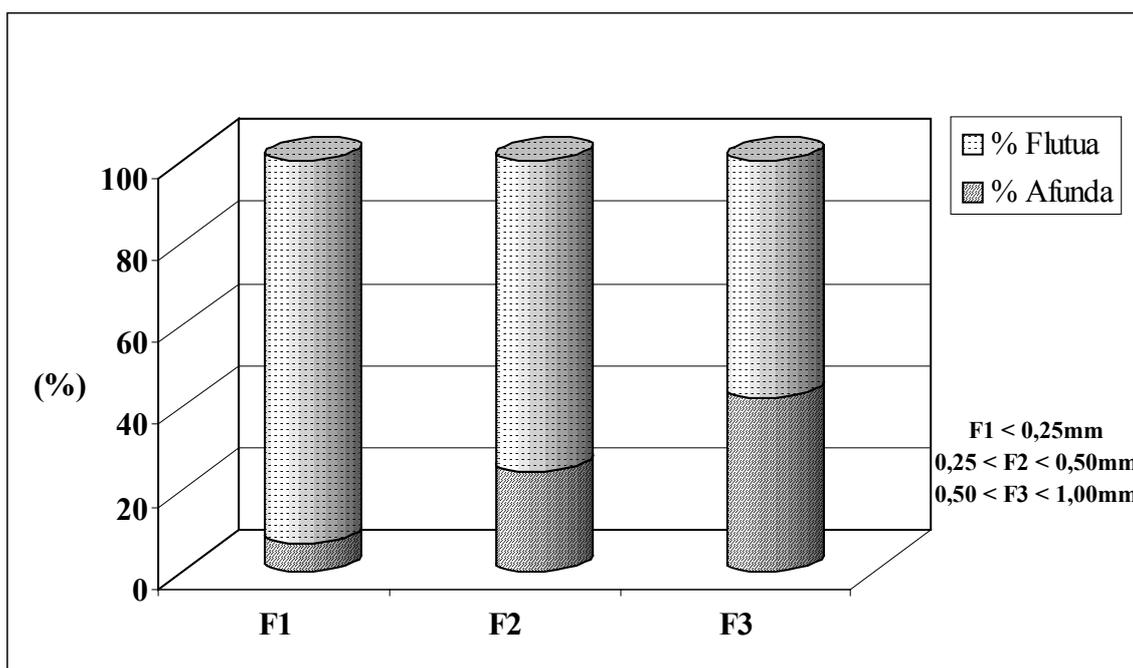


Fig. 28 – Percentagem de material que afunda e que flutua das frações de PCI em contato com TBE (com densidade = $2,5 \text{ g.cm}^{-3}$) durante 2 horas.

Com a fração que afundou foi feita uma análise do que era metal e o que não era, o resultado está mostrado na figura 29. Foi considerado como parte metálica o material que foi digerido com água régia aquecida durante aproximadamente 15 minutos.

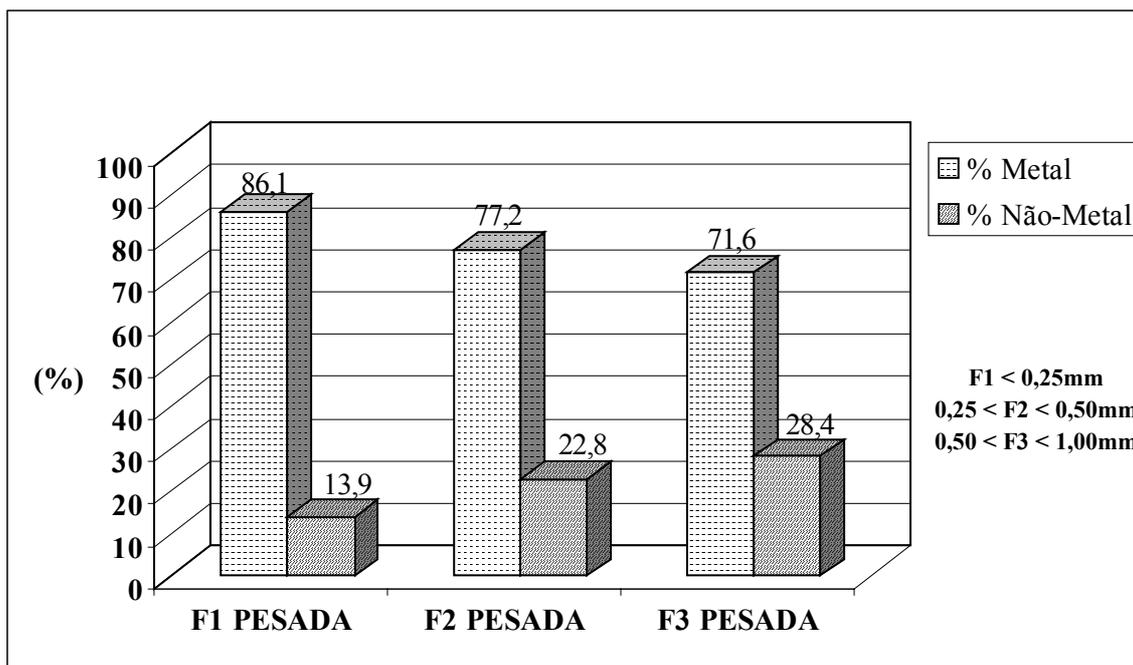


Fig. 29 – Percentagem de metal e não-metal das frações de PCI que afundaram em contato com TBE.

Tanto a fração que afundou como a que flutuou foram analisadas quimicamente e obteve-se a percentagem dos principais componentes, que estão mostrados na tabela 13.

Tabela 13 – Análise química das frações de PCI após separação por densidade.

ANÁLISE QUÍMICA DE PCI APÓS SEPARAÇÃO POR DENSIDADE							
(%)	Cu	Zn	Fe	Ni	Al	Pb	Sn
F1 PESADA	64,97	0,26	0,13	0,34	0,52	1,61	2,60
F2 PESADA	54,99	0,20	0,30	0,47	0,50	1,40	5,0
F3 PESADA	44,96	0,17	0,77	0,37	0,50	1,42	15,0
F1 LEVE	0,24	0,02	0,07	0,05	0,48	0,12	2,39
F2 LEVE	0,42	0,02	0,07	0,05	1,04	0,12	2,48
F3 LEVE	3,25	0,02	0,07	0,05	0,50	0,12	2,50

A partir da tabela 13 (acima) pode-se fazer um gráfico (figura 30) que mostra as percentagens de Cobre após a separação por Densidade.

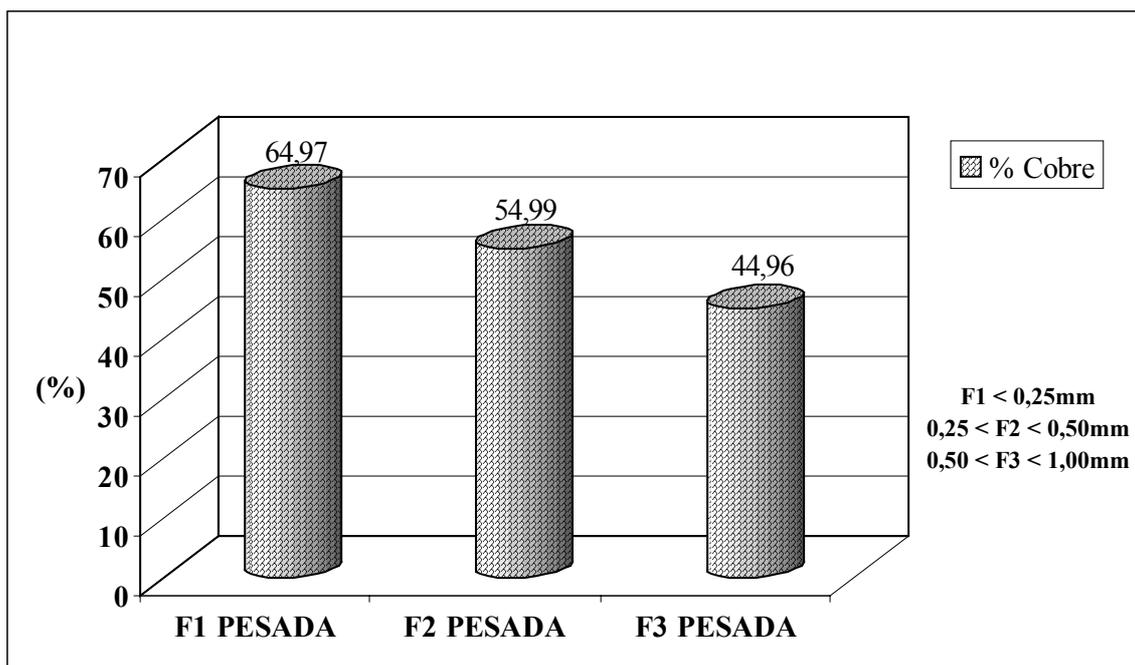


Fig. 30 – Percentagem de Cobre nas frações pesadas de PCI após separação por densidade.

Como se pode ver na figura 30 a maior quantidade de cobre após a separação por densidade se concentrou na fração 1, a de menor granulometria, ao contrário do que acontece na separação granulométrica.

4.3.2 SEPARAÇÃO POR DENSIDADE PARA COMPONENTES ELETRÔNICOS (CE)

Seguindo a mesma seqüência apresentada para PCI, tem-se a figura 31 que mostra a percentagem de material que afunda e que flutua quando efetuada a separação por densidade de CE.

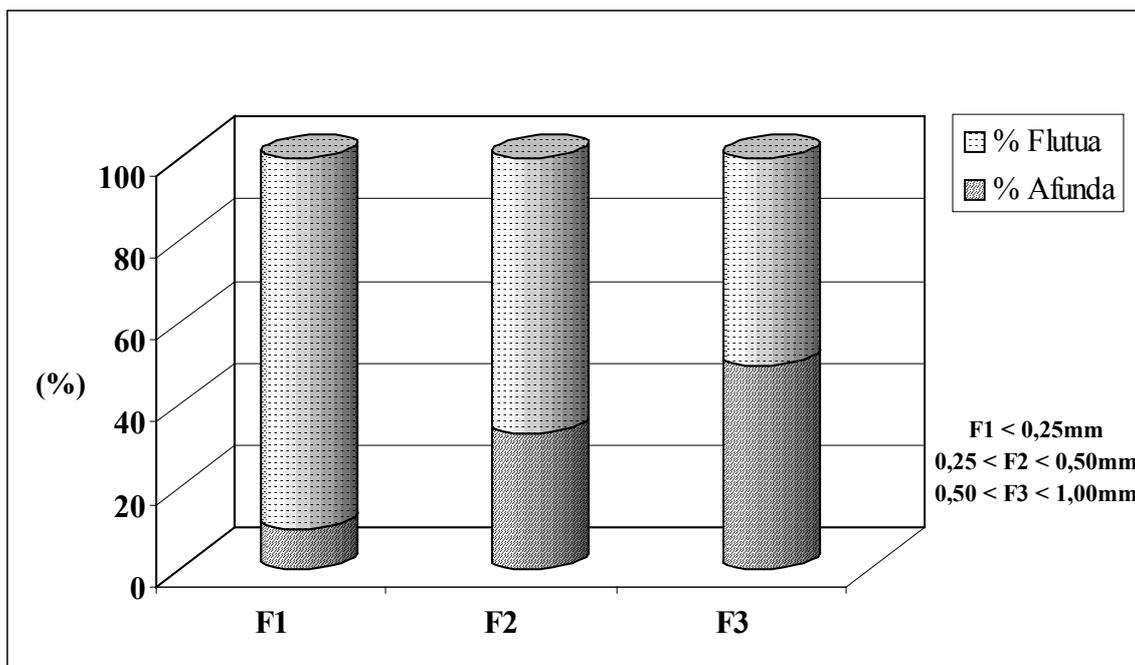


Fig. 31 – Percentagem de material que afunda e que flutua das frações de CE em contato com TBE (com densidade = $2,5 \text{ g.cm}^{-3}$) durante 2 horas.

Com a fração que afundou também se calculou quanto era metal e quanto não era. Seguindo os mesmos procedimentos usados para PCI pode-se construir um gráfico (figura 32) que mostra essa diferença para CE.

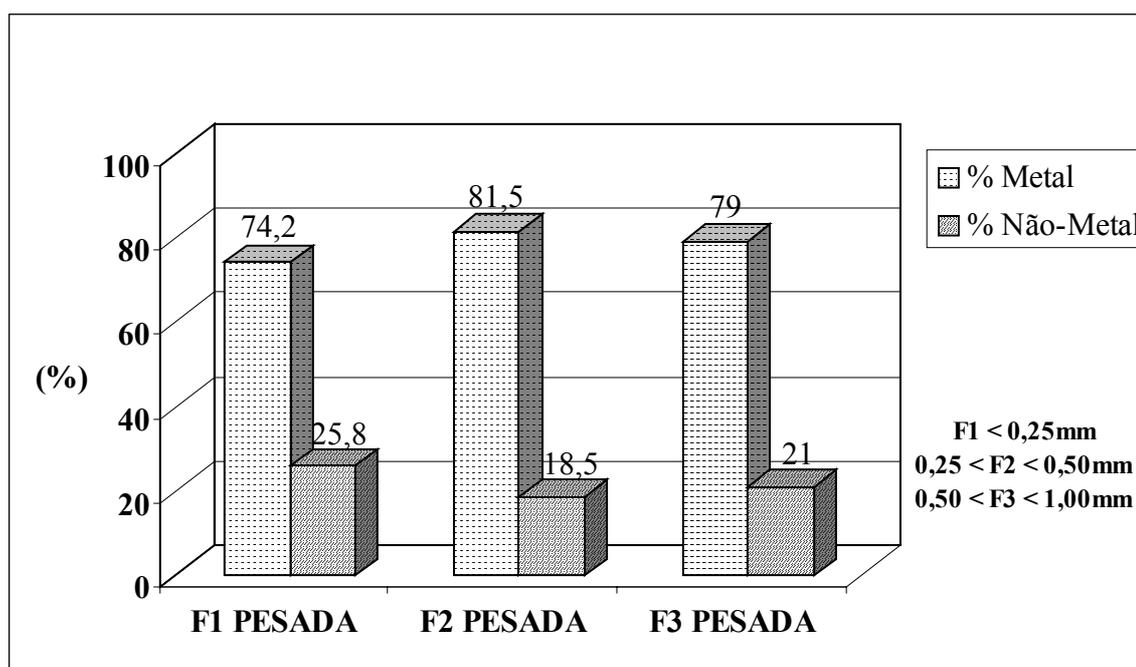


Fig. 32 – Percentagem de metal e não-metal das frações de CE que afundaram.

Com as frações que afundaram e também com as que flutuaram foi feita uma análise química, que está mostrada na tabela 14.

Tabela 14 – Análise química das frações de CE após separação por densidade.

ANÁLISE QUÍMICA DE CE APÓS SEPARAÇÃO POR DENSIDADE							
(%)	Cu	Zn	Fe	Al	Ni	Pb	Sn
F1 PESADA	39,13	0,41	0,007	0,09	0,39	4,31	14,17
F2 PESADA	57	1,24	0,008	0,02	0,42	4,67	10,51
F3 PESADA	64,76	0,84	0,008	0,04	0,39	3,51	11,83
F1 LEVE	3,71	ND	0,09	1,17	0,15	0,39	0,62
F2 LEVE	1,41	ND	0,18	1,07	0,09	0,15	0,25
F3 LEVE	1,56	0,007	0,11	1,37	0,06	0,07	0,12

A partir da tabela 14 pode-se fazer um gráfico (figura 33) que mostra a concentração de cobre após a separação por densidade.

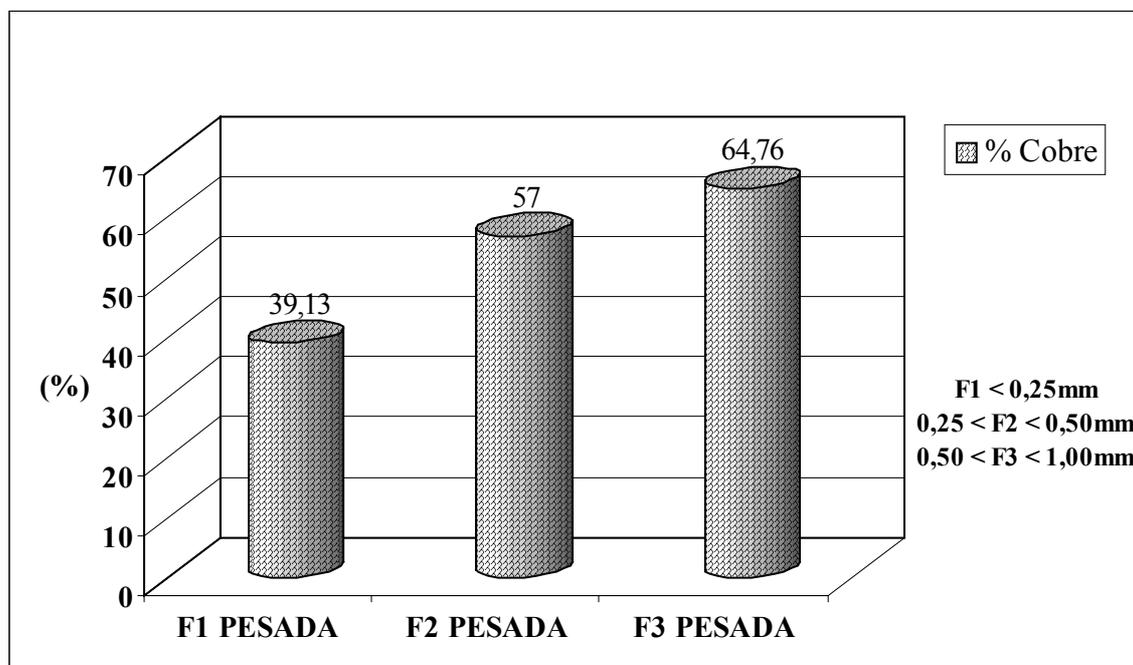


Fig. 33 – Percentagem de Cobre nas frações pesadas de CE após separação por densidade.

4.3.3 SEPARAÇÃO POR DENSIDADE PARA SUBSTRATO (SP)

Seguindo a mesma seqüência apresentada anteriormente, tem-se a figura 34 que mostra a percentagem de material que afunda e que flutua quando efetuada a separação por densidade para SP.

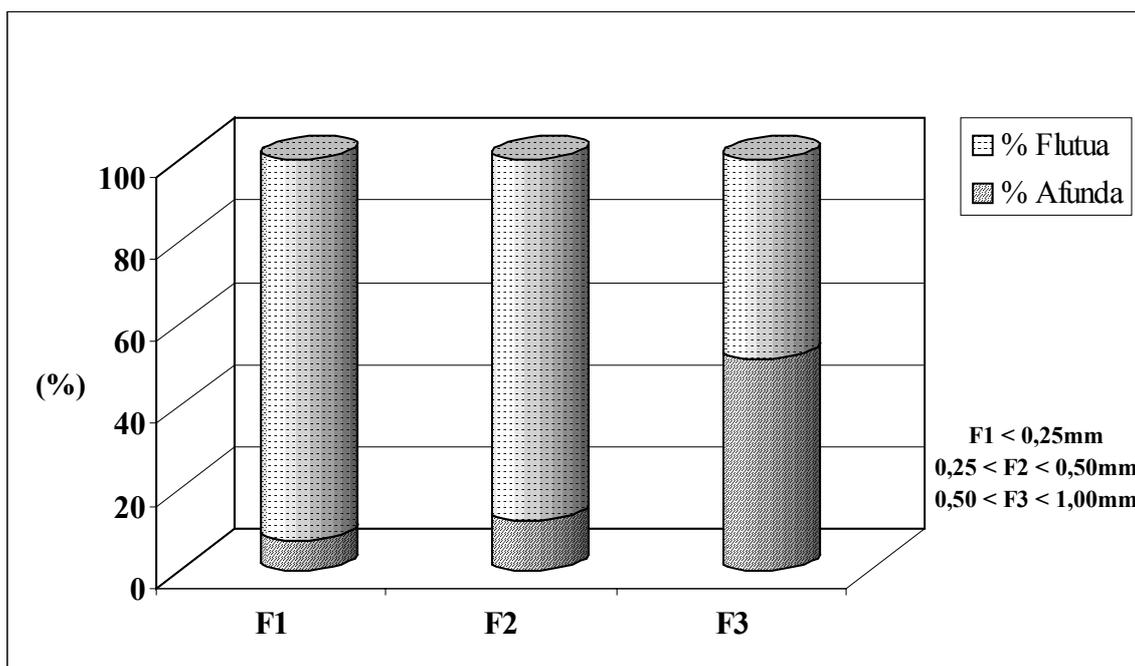


Fig. 34 – Percentagem de material que afunda e que flutua das frações de SP em contato com TBE (com densidade = $2,5 \text{ g.cm}^{-3}$) durante 2 horas.

Com a fração que afundou também calculou-se quanto era metal e quanto não era. Seguindo os mesmos procedimentos usados anteriormente para PCI e CE pode-se construir o gráfico (figura 35) que mostra essa diferença.

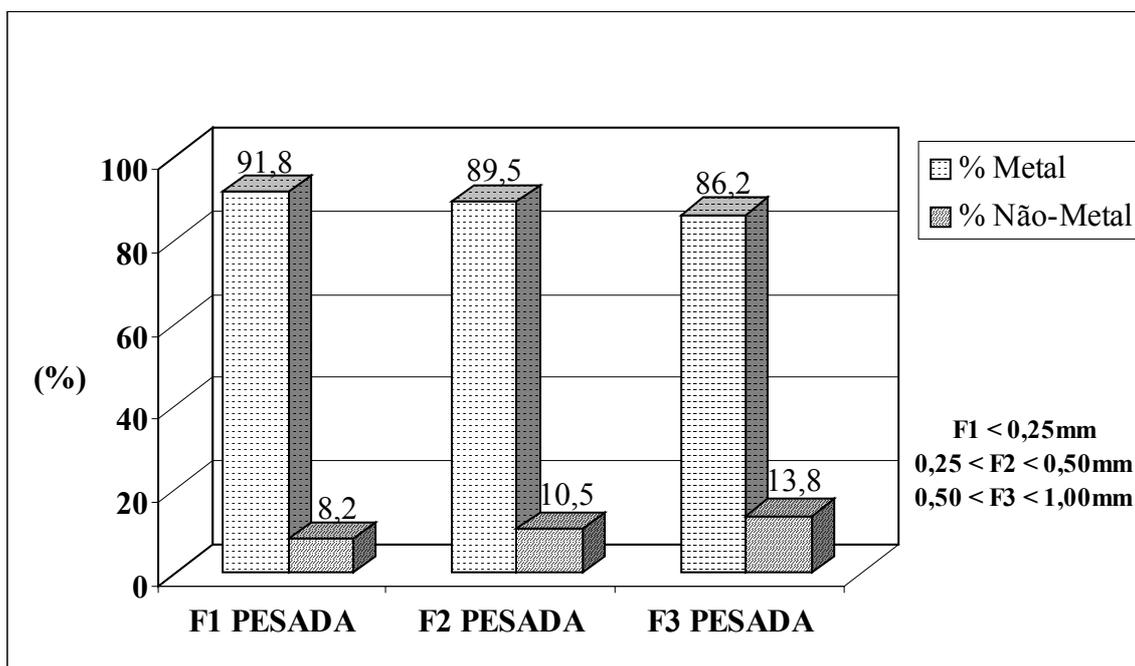


Fig. 35 – Percentagem de metal e não-metal das frações de SP que afundaram.

Com as frações que afundaram e as que flutuaram foi feita análise química, que está mostrado na tabela 15.

Tabela 15 – Análise química das frações de SP após separação por densidade.

ANÁLISE QUÍMICA DE SP APÓS SEPARAÇÃO POR DENSIDADE							
(%)	Cu	Zn	Fe	Al	Ni	Pb	Sn
F1 PESADA	78,03	0,080	0,463	0,07	0,46	3,37	9,94
F2 PESADA	77,53	0,121	0,630	0,07	0,45	3,6	10,32
F3 PESADA	62,97	0,063	1,376	0,07	0,47	2,22	20,82
F1 LEVE	0,19	0,004	0,157	0,16	0,03	0,07	0,07
F2 LEVE	2,56	0,006	0,057	0,12	0,04	0,04	0,07
F3 LEVE	3,86	0,006	0,045	1,4	0,18	0,09	0,14

A partir da tabela 15 pode-se fazer o gráfico (figura 36) que mostra a concentração de Cobre após a separação por densidade.

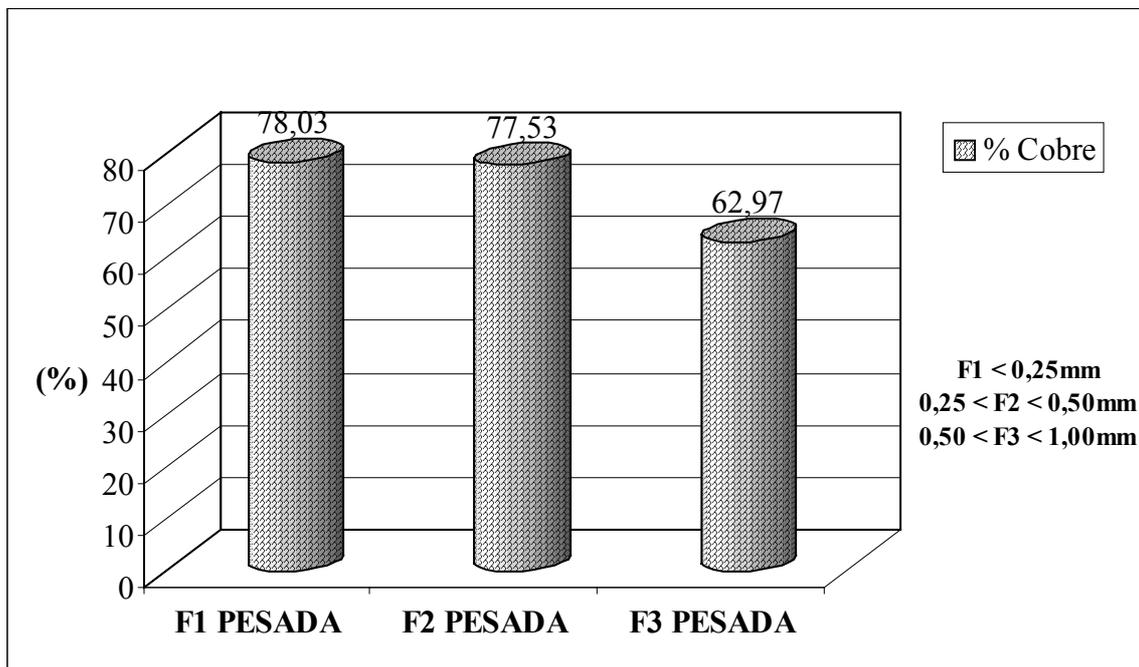


Fig. 36 – Percentagem de Cobre nas frações pesadas de SP após separação por densidade.

4.3.4 CONCENTRAÇÃO DE METAIS EM FUNÇÃO DA DENSIDADE

Como se pode observar, os três tipos de sucatas apresentam o mesmo comportamento, ou seja, a percentagem que afunda cresce como cresce a granulometria. Isso já era de se esperar, pois na etapa anterior verificou-se que sempre na fração de maior granulometria se concentrava a maior parte dos metais. Então quando se realiza a separação por densidade, esperava-se que a parte que fosse metálica afundaria e o resto flutuaria.

Os resultados confirmaram esta expectativa e na fração 3 das figuras 28, 31 e 34 a quantidade de material afundado é maior que nas outras frações, pois possui mais metais.

Devido a característica do processo de separação por densidade em que alguns fatores como: viscosidade, coeficiente de arraste, granulometria das partículas e a própria densidade tem grande influência na eficiência do processo, esperava-se que a diferença de eficiência entre as 3 frações (F1, F2 e F3) não fosse muito acentuada, e realmente é isso que acontece, quando comparada a quantidade de metais presentes nas três frações. A diferença entre a fração mais fina (F1) e a fração mais grossa (F3) para a quantidade de metal nos três tipos de sucatas é bem inferior aos valores verificados após a separação granulométrica. Por exemplo,

na figura 35 (para SP) a diferença entre a quantidade de metal na fração mais fina (F1) e na fração mais grossa (F3) é cerca de 5,6% enquanto que na figura 26 também para SP, mas apenas com a separação granulométrica, a diferença entre a fração mais fina (F1) e a mais grossa (F3) é cerca de 23,2%.

Outra grande diferença existente é que enquanto os metais se concentram mais na fração de maior granulometria após uma separação granulométrica, provavelmente devido a maior dificuldade de moer metais, na separação por densidade e nas granulometrias testadas, a diferença não foi tão bem observada. Assim, em linhas gerais os metais estão mais concentrados na fração de menor granulometria para PCI e SP.

Para os componentes (CE) a fração metálica está dividida entre as três frações, o que deve indicar que uma melhor liberação entre as partículas foi alcançada. Isso pode estar relacionado à forma que as partículas assumem após moagem e que influenciam a separação por diferença de densidade^(24,60,62)

A partir dos resultados da análise química das frações leves e pesadas (na tabela 13 (para PCI), 14 (para CE) e 15 (para SP)), pode-se ver que realmente os metais se concentram na fração que afunda validando totalmente o processo de separação por densidade.

A exceção é o alumínio que apresentou uma tendência para as frações leves. Isso ocorre devido a sua densidade ($2,7 \text{ g.cm}^{-3}$) que está muito próxima da densidade de corte usada ($2,5 \text{ g.cm}^{-3}$).

Técnicas de separação por densidade que são bem conhecidas na indústria de processamento mineral tem encontrado aplicações na reciclagem de sucatas eletrônicas baseado no fato de que sucata eletrônica consiste essencialmente de plásticos, com uma densidade menor que 2 g.cm^{-3} , metais leves, como alumínio, e vidro, com uma densidade de $2,7 \text{ g.cm}^{-3}$, e metais pesados, predominantemente cobre e ferromagnéticos, com densidades maiores que 7 g.cm^{-3} ⁽²⁵⁾.

Zhang⁽²⁵⁾ também mostra que aproximadamente 50% (em peso) do flutuado que é principalmente plástico, pode ser separado com densidades menores que 2 g.cm^{-3} .

Para os outros elementos analisados o resultado foi muito bom, podendo-se destacar o cobre, o chumbo e o estanho.

O chumbo e o estanho tiveram ótimo resultado nas sucatas de CE e SP. Na sucata de SP o estanho alcançou 20% na fração 3 pesada e o chumbo chegou a 3,6% na fração 2 pesada. Nos CE o chumbo teve 4,7% na fração 2 e o estanho 14,2 na fração 1.

Para o cobre os resultados são ainda melhores, pois para PCI o cobre alcança 65% na fração mais fina, para CE alcança 65% na fração 3 pesada e para SP chegou a 78% na fração 1.

Uma análise detalhada do processo afunda/flutua das sucatas feita por Zhang⁽⁴⁾ mostra que técnicas de separação a base de densidade são capazes de produzir um concentrado de cobre de alta pureza.

Outro resultado interessante é para o níquel que em média concentra 10 vezes mais nas frações pesadas do que nas leves.

Fazendo um exercício de cálculo em cima dos resultados expostos para saber quanto de metal e quanto de cobre poder-se-ia recuperar de 100Kg de sucatas, obtiveram-se os seguintes resultados:

- Para 100Kg de sucata de PCI se obteria em média 16,4 Kg de metal, sendo que 8,3 Kg seriam de cobre.
- Para 100 Kg de sucata de CE recuperar-se-ia em média 21,7 Kg de metal, sendo que 12,9 Kg seriam de cobre.
- Para sucatas de SP tem-se 18,3 Kg de metal e 12,2 Kg de cobre.

Comparando os valores do cobre com o que seria possível retirar de 100Kg de minérios, no máximo 3Kg, comprova-se mais uma vez que as Placas de Circuito Impresso são matérias primas muito interessantes e valiosas.

4.4 LIXIVIAÇÃO

Os ensaios de lixiviação foram feitos nas sucatas a fim de caracterizar esse material quanto ao seu grau de periculosidade. O ensaio simula o que aconteceria na prática caso essas sucatas fossem dispostas em aterros.

Depois que as sucatas passaram pelo processamento à base da diferença de densidade (separação por densidade), a parte que afundou foi considerada a parte metálica, ou seja, a parte de interesse. Mas nesse processo gerou-se a fração leve, que flutuou, e que por não conter quantidades razoáveis de metais, não tem interesse neste estudo, mas que deve ser caracterizada quanto a sua periculosidade, pois trata-se do resíduo do processo e deverá ser disposto de alguma maneira. Esse resíduo então, a fração leve das sucatas, foi também lixiviado.

Os resultados dos ensaios de lixiviação também serão apresentados em 3 itens.

4.4.1 LIXIVIAÇÃO DE PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO (PCI)

Os ensaios de lixiviação foram feitos em dois momentos do processo. O primeiro ensaio foi feito após a separação granulométrica e a análise química está mostrada na tabela 16.

Tabela 16 – Análise química do lixiviado das frações de PCI após separação granulométrica.

LIXIVIAÇÃO DE PCI APÓS SEPARAÇÃO GRANULOMÉTRICA (mg.L⁻¹)									
	Fluoreto	Cd	Pb	Cr	Ba	Ag	Hg	As	Se
F1	< 0,02	0,01	482	< 0,02	< 1	0,02	0,001	< 0,005	0,031
F2	< 0,02	0,01	993	< 0,02	< 1	< 0,02	0,0016	< 0,005	0,024
F3	< 0,02	< 0,01	15	< 0,02	< 1	< 0,02	0,0012	< 0,005	0,042
NBR 10004		0,5	5,0	5,0	100,0	5,0	0,1	5,0	1,0

Comparando com a listagem 7 da norma NBR 10004 que fornece os valores máximos de concentração para cada elemento, pode-se ver que o chumbo está bem acima do teor permitido (5,0 mg.L⁻¹), o que torna as sucatas de Placas de Circuito Impresso, resíduos classe I (perigosos) e dispensam o ensaio de solubilização.

O segundo ensaio foi realizado após a separação por densidade nas frações leves e a análise química foi feita apenas para o chumbo que era o elemento que originalmente está acima dos teores permitidos. O resultado da análise química está mostrado na tabela 17.

Tabela 17 – Análise química do Chumbo nas frações leves de PCI lixiviadas após separação por densidade.

LIXIVIAÇÃO DAS FRAÇÕES LEVES APÓS A SEPARAÇÃO POR DENSIDADE	
	Chumbo (Pb) (mg.L⁻¹)
F1 LEVE	46
F2 LEVE	13
F3 LEVE	15
NBR 10004	5

Na análise da fração leve proveniente da separação por densidade pode-se ver que o teor de chumbo caiu drasticamente, ou seja, a maior parte do chumbo foi parar na fração pesada (a que afundou) e deve ser recuperado.

Mas mesmo assim pode-se notar que os teores de chumbo permanecem acima do teor máximo ($5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) permitido pela norma brasileira. Com isso, a fração leve que se retira do processo de separação por densidade não pode ser disposta de qualquer maneira, sendo necessário um tratamento prévio, ou até mesmo uma recuperação dos materiais existentes (principalmente polímeros e cerâmicos).

4.4.2 LIXIVIAÇÃO DE COMPONENTES ELETRÔNICOS (CE)

Para este resíduo também foram feitos dois ensaios de lixiviação. O primeiro após a separação granulométrica, cuja análise química esta na tabela 18.

Tabela 18 – Análise química dos lixiviados das frações de CE após separação granulométrica.

LIXIVIAÇÃO DE CE APÓS SEPARAÇÃO GRANULOMÉTRICA								
	Cd	Pb	Cr	Ba	Ag	Hg	As	Se
F1	0,31	800	< 0,02	< 1	< 0,01	0,0006	-	0,187
F2	0,20	1000	< 0,02	< 1	0,10	0,0005	-	0,438
F3	0,15	1200	< 0,02	< 1	0,02	0,0005	-	0,146
NBR 10004	0,5	5,0	5,0	100,0	5,0	0,1	5,0	1,0

Novamente o Chumbo é o elemento que está acima dos teores permitidos pela norma brasileira. Na tabela 18 (para CE) os elementos cádmio e selênio possuem teores relativamente elevados, mas ainda assim estão abaixo dos teores máximos permitidos pela norma brasileira, fazendo com que as sucatas de CE sejam classificadas como perigosas por causa exclusivamente do chumbo.

O segundo ensaio foi feito após a separação por densidade nas frações leves. Desta vez fez-se análise química no Cádmio e no Selênio, além do Chumbo, por estes terem apresentados valores relativamente altos na primeira lixiviação, mesmo estando dentro dos teores permitidos. Os resultados estão na tabela 19.

Tabela 19 – Análise química de Cd, Pb e Se nas frações leves de CE lixiviadas após separação por densidade.

LIXIVIAÇÃO DAS FRAÇÕES LEVES APÓS SEPARAÇÃO POR DENSIDADE			
	Cd (mg.L⁻¹)	Pb (mg.L⁻¹)	Se (µg.L⁻¹)
F1 LEVE	0,12	82	< 0,005
F2 LEVE	0,17	34	< 0,005
F3 LEVE	0,03	10	< 0,005
NBR 10004	0,5	5,0	1,0

Em todos os três elementos analisados a redução nos teores foi bem acentuada, mas ainda o Chumbo continua acima dos teores permitidos.

4.4.3 LIXIVIAÇÃO DE SUBSTRATO (SP)

Novamente os ensaios de lixiviação foram feitos após a separação granulométrica do substrato. As análises químicas estão na tabela 20. Após a separação por densidade, as frações leves foram lixiviadas, e a análise química foi feita só para o Chumbo. O resultado está na tabela 21.

Tabela 20 – Análise química das frações de SP lixiviadas após separação granulométrica.

LIXIVIAÇÃO DE SP APÓS SEPARAÇÃO GRANULOMÉTRICA								
	Cd	Pb	Cr	Ba	Ag	Hg	As	Se
F1	0,02	362	< 0,02	< 1	< 0,01	0,002	-	0,022
F2	0,02	337	< 0,02	< 1	< 0,01	0,0016	-	0,020
F3	0,02	1800	< 0,02	< 1	< 0,01	< 0,0001	-	0,031
NBR 10004	0,5	5,0	5,0	100,0	5,0	0,1	5,0	1,0

Tabela 21 – Análise química de Pb nas frações leves de SP lixiviadas após separação por densidade.

LIXIVIAÇÃO DAS FRAÇÕES LEVES APÓS A SEPARAÇÃO POR DENSIDADE	
	Pb (mg.L⁻¹)
F1 LEVE	27
F2 LEVE	29
F3 LEVE	20
NBR 10004	5

Igualmente aos casos anteriores o teor de Chumbo diminui bastante, mas não o suficiente para ficar abaixo dos teores máximos permitidos.

Deve-se considerar também que outros compostos potencialmente tóxicos, por exemplo o bromo, que não foram analisados.

Zhang⁽⁴⁾ cita em seu artigo que uma substancial porção de bromo foi detectada nas frações finas.

A presença de bromo em sucatas eletrônicas vem da grande variedade de plásticos que são tratados com retardantes de chama. Esses compostos químicos normalmente contém bromo. Por isso eles são potencialmente perigosos, e deve se tomar cuidado com as sucatas eletrônicas, pois o bromo quando colocado em contato com materiais orgânicos e tratado termicamente numa faixa de temperatura entre 200 e 1500 °C podem gerar dioxinas e furanos que são éteres aromáticos cíclicos halogenados⁽⁸¹⁾

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos nesse trabalho pode-se afirmar que:

- Sucatas de Placas de Circuito Impresso podem ser recicladas através de Processamento Mecânico.
- As sucatas são matérias primas interessantes pois apresentam quantidades de metais que justificam o seu reaproveitamento do ponto de vista econômico.
- O metal que está presente em maiores quantidades é o Cobre, mas o Chumbo e o Estanho também possuem uma grande participação na composição das Placas de Circuito Impresso analisadas.
- As Placas de Circuito Impresso possuem metais valiosos como Ouro, Prata e Paládio, que podem ser recuperados.
- Pelas normas brasileiras as Placas de Circuito Impresso devem ser classificadas como resíduos de classe I, ou seja, são resíduos perigosos que necessitam de um tratamento para serem dispostos.
- As Placas de Circuito Impresso são classificadas como resíduos perigosos devido ao alto teor de Chumbo existente nelas.
- Através apenas do processo de cominuição é possível concentrar metais, principalmente nas frações de maior granulometria ($0,5\text{mm} < F < 1\text{mm}$).
- A separação por densidade através de líquidos orgânicos ($d = 2,5 \text{ g.cm}^{-3}$) para uso em laboratório se mostrou bastante eficiente, alcançando uma concentração de mais de 80% de metais na fração afundada.
- Após Separação por Densidade a fração metálica possui cerca de 65% de Cobre.
- A fração leve resultante do processo de Separação por Densidade é considerada como resíduo, e como tal, foi caracterizada de acordo com as normas brasileiras e classificada como resíduo perigoso, pois o teor de Chumbo ainda permanece acima do permitido.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Aplicar Separação a base de Propriedades Elétricas após o processo de cominuição.
- Aplicar técnicas Eletroquímicas na fração metálica proveniente da Separação por Densidade para separar os metais entre si.
- Fazer uma Planta piloto com o uso de suspensões para fazer a Separação por Densidade, evitando-se o uso de líquidos orgânicos.
- Estudar novas densidades de corte para melhorar a eficiência do processo.
- Estudar o efeito do uso de granulometrias menores e maiores na eficiência do processo.
- Estudar a influência da forma das partículas no processo de separação por densidade.
- Estudar a possibilidade de recuperar a solda antes do processamento mecânico através de processos térmicos.
- Estudar a possibilidade de recuperar Ouro, Prata e Paládio através de técnicas eletroquímicas.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ¹ SAITO, Isamu. Recovery of valuable metals from printed wiring board wastes. Trans. Mat. Res. Soc., Japão, v. 18A, p. 207-214. 1994.
- ² ZHANG, Shunli, FORSSBERG, Eric et al. Aluminum recovery from electronic scrap by high-force[®] eddy-current separators. Resources, Conservation and Recycling, v. 23, p. 225-241, 1998.
- ³ BERNARDES, Andrea, WUTH, Wolfgang et al. Recycling of printed circuit boards by melting with oxidising/reducing top blowing process. In: TMS Annual Meeting, Orlando, EUA, p.363-375, 1997.
- ⁴ ZHANG, Shunli, FORSSBERG, Eric. Intelligent liberation and classification of electronic scrap. Powder Technology, v.105, p. 295-301, 1999.
- ⁵ TENÓRIO, Jorge Alberto Soares, MENETTI, Ricardo Perez, CHAVES, Arthur Pinto. Production of non-ferrous metallic concentrates from electronic scrap. In: TMS Annual Meeting, Orlando, EUA, p. 505-509, 1997.
- ⁶ FELIX, Noel, RIET, Chris Van. Recycling of electronic scrap at um's hoboken smelter. In: International Precious Metals Conference, Vancouver, Canada, p. 159-169, 1994.
- ⁷ SUM, Elaine Y. L.. The recovery of metals from electronic scrap. JOM, p. 53-61, abr. 1991.
- ⁸ PEIRCE, Jeffrey J., WEINER, Ruth F., VESILIND, Aarne P.. Environmental Pollution and control. 4th ed., Butterworth-Heinmann. p. 177-191, USA, 1998.
- ⁹ GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. Decreto N° 38.356, de 01 de abril de 1998. Diário Oficial da União, 02 abr. 1998.
- ¹⁰ GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. Lei N° 11.187, de 07 de julho de 1998. Diário Oficial da União. Jul. 1998.

¹¹ PIETRELLI, Loris. Separation technologies: tools to improve the sustainable development. In: Rewas, San Sebastian, Espanha, p. 223-229. Sep. 1999.

¹² LARRAURI, E., MIGUEL, R., SUÁREZ, M.J.. Recovery, recycling and reuse of packaging materials from post consumer wastes. In: Rewas, San Sebastian, Espanha, p. 75-85. Sep. 1999.

¹³ BAILEY, Barry. Recycling of low grade precious metal scrap. In: Rewas, San Sebastian, Espanha, p. 1345-1353. Sep. 1999.

¹⁴ CATTANACH, Robert E. et al. The handbook of environmentally conscious manufacturing – From design & production to labeling & recycling. IRWIN. p. 51-58. USA. 1995.

¹⁵ YOUNG, S.B., VANDERBURG, W.H. Applying environmental life-cycle analysis to materials. JOM. Apr. 1994.

¹⁶ BHAKTA, P.N.H. Recent technology and trends in automotive recycling. JOM. Feb. 1994.

¹⁷ FLEISCHMANN, Shirley, T. et al. Environmental aspects of design. ASM Handbook, Materials Selection and Design, vol. 20, p. 131-138. USA. 1997.

¹⁸ WÜRTH ELEKTRONIK GmbH & Co. Apresenta uma parceria entre a Würth Elektronik e a Technische Universität Dresden para desenvolvimento de PCI recicláveis, além de apresentar dados estatísticos sobre a quantidade de sucatas eletrônicas geradas na Alemanha e os elementos perigosos associados as PCI convencionais. Disponível em: <<http://www.wuerth-elektronik.de>>. Acesso em: 16 abr. 2001.

¹⁹ KOCH, P., KASPER, R.. Dismantling and process technology for electronic scrap and discarded electric appliances. Technik 37, Nr. 5. p. 211-220. 1996

-
- ²⁰ FREAR, D. R., WINTERBOTTOM, W. L.. Materials, processing, and reliability issues for PWB assemblies. JOM. p. 26. Jun. 1995.
- ²¹ RILEY, William D., DAELLENBACH, Charles B., GABLER, Robert C.. Recycling of electronic scrap. U.S. Bureau of Mines, Albany Research Center. (ca. 1991).
- ²² LEE, C. H. et al. Management of scrap computer recycling in Taiwan. Journal of Hazardous Materials. Vol. A73. p. 209-220. 2000.
- ²³ WEI, M. S., HUANG, K. H.. Recycling and reuse of industrial wastes in Taiwan. Waste Management. Vol. 21. p.93-97. 2001.
- ²⁴ HAYES, Peter C.. Process Principles in Minerals and Materials Production. Hayes Publishing CO. p. 29. Brisbane, Austrália, 1993.
- ²⁵ ZHANG, Shunli, FORSSBERG, Eric. Mechanical separation-oriented characterization of electronic scrap. Resources, Conservation and Recycling, v. 21, p. 247-269, 1997.
- ²⁶ HOFFMANN, James E.. Recovering precious metals from electronic scrap. JOM, July, 1992.
- ²⁷ POZZO, R.L., MALICSI, A.S., IWASAKI, I.. Removal of lead from printed circuit board scrap by an electrodisolution-delamination method. Resources, Conservation and Recycling, v. 5, p. 21-34, 1991.
- ²⁸ DISTIN, P. A.. Metals recovery from electronic scrap using mineral processing methods. In: 34th Annual Conference of Metallurgists of CIM, Vancouver, Canadá, p. 245-252, Aug. 1995.
- ²⁹ WANG, H. P., CHIEN, Y. et al. Fate of bromine in pyrolysis of printed circuit board wastes. Chemosphere, v. 40, p. 383-387, 2000.

-
- ³⁰ IN RHEE, Kang et al. A recovery of gold from electronic scrap by mechanical separation, acid leaching and electrowinning. In: Third International Symposium on Recycling of Metals and Engineered Materials, The Minerals, Metals & Materials Society, p. 469-473, 1995.
- ³¹ ANGERER, G., BÄTTCHER, K., BARS, P.. Verwertung von Elektronikschrott. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis – Band 59, ed. Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI). Alemanha. 1993.
- ³² THIELE, W., MATSCHINER, H.. Neue Wege zur Aufarbeitung von Elektronikschrott. Ed. G. Fleischer, EDV – Elektronikschrott – Abfallwirtschaft. p. 193 – 203. Alemanha. 1993.
- ³³ SCHLÖGL, M.. Recycling von Elektró und Elektronikshrott. Vogel Fachbuch. Alemanha. 1995.
- ³⁴ LEGARTH, J. B.. Environmental decision making for recycling options. Resources, Conservation and Recycling. Vol. 19. p. 109-135. 1997.
- ³⁵ MASATOSHI, Iji, IKUTA, Yuji. Pyrolysis – based material recovery from molding resin for electronic parts. Journal of Environmental Engineering. p. 821-828. Sep. 1998.
- ³⁶ SHICHANG, Zou. et al. Recycling of electric materials. Trans. Mat. Res. Soc. vol. 18A. p. 201-206. Japão. 1994.
- ³⁷ SZCZYGIEL, Z. et al. The direct reduction of sulfide minerals for the recovery of precious metals. JOM. p. 55-59. Apr. 1998.
- ³⁸ GLOE, K., MÜHL, P., KNOTHE, M.. Recovery of precious metals from electronic scrap, in particular from waste products of the thick-layer technique. Hydrometallurgy, v. 25, p. 99-110, 1990.
- ³⁹ GLUSZCZYSZYN, A. et al. Secondary gold – recovery from electronic scrap in Poland. Recycling of Metalliferous Materials. IMM – The Institution of Mining and Metallurgy. p. 87-91. Birmingham, Inglaterra. Apr. 1990.

⁴⁰ VEJNAR, P., HRABÁK, V.. Recovery of non-ferrous and precious metals from secondary raw materials. Recycling of Metalliferous Materials. IMM – The Institution of Mining and Metallurgy. p. 275-281. Birmingham, Inglaterra. Apr. 1990.

⁴¹ REINHARD, Fred P.. A process for the recovery of raw materials from used batteries. Proceedings of the Symposium on Electrochemical Technology Applied to Environmental Problems. Volume 95-12. The Electrochemical Society, Inc. p. 168-175. 1995.

⁴² GANNI, H., BREZOVEC, P.. Recycle/recovery techniques for aqueous discharges from metal finishing operations. Proceedings of the Symposium on Electrochemical Technology Applied to Environmental Problems. Volume 95-12. The Electrochemical Society, Inc. p. 53-71. 1995.

⁴³ PLETCHER, D.. Electrochemical technology for a cleaner environment – fundamental considerations. Electrochemistry for a Cleaner Environment. Electrosynthesis Company, Inc. p. 11-49. 1992.

⁴⁴ SCHWARTZ, M., SUZUKI, R., NOBE, K.. Electrochemical removal and recovery of metals from waste streams. Proceedings of the Symposium on Electrochemical Technology Applied to Environmental Problems. Volume 95-12. The Electrochemical Society, Inc. p. 81-91. 1995.

⁴⁵ NJAU, K. N. et al. Electrochemical removal of nickel and chromate from dilute process water. 5th European Symposium on Electrochemical Engineering. p. 161-170. Exeter. 1999.

⁴⁶ FORNARI, P., ABBRUZZESE, C.. Copper and nickel selective recovery by electrowinning from electronic and galvanic industrial solutions. Hydrometallurgy 52. p. 209-222. 1999.

⁴⁷ BROWN, Craig J.. Metal recovery by ion exchange and electrowinning. Electrochemistry for a Cleaner Environment. Electrosynthesis Company, Inc. p. 183-205. 1992.

-
- ⁴⁸ KÉKESI, T., TÖRÖK, T., KABELIK, G.. Extraction of tin from scrap by chemical and electrochemical methods in alkaline media. *Hydrometallurgy* 55. p. 213-222. 2000.
- ⁴⁹ DINI, Jack W.. *Electrodeposition – The Materials Science of Coatings and Substrates*. Aspect Publications LTD. p. 232-237. 1993.
- ⁵⁰ WILLS, B. A.. *Mineral Processing Technology*. 4th ed. Pergamon Press. Great Britain, 1988.
- ⁵¹ TENÓRIO, J., OLIVEIRA, D., CHAVES, A.. Carbon-zinc batteries treatment by ore processing methods. In: *Rewas, San Sebastian, Espanha*. p. 1153-1160. 1999.
- ⁵² RON, A., PENEV, K.. Disassembly and recycling of electronic consumer products: an overview. *Technovation*. Vol. 15. N° 6. p.363-374. 1995.
- ⁵³ NOAKES, M.. Using minerals processing technologies for the treatment of hazardous substances. In: *Rewas, San Sebastian, Espanha*. p. 27-36. 1999.
- ⁵⁴ SANDVIK, K. et al. Development of a mineral processing modelling program as a tool for optimal decisions in waste treatment. In: *Rewas, San Sebastian, Espanha*. p. 55-64. 1999.
- ⁵⁵ PEACE, J. Recovery, upgrading and recycling of steel scrap from pre-and post-incinerated refuse. *La Revue de Métallurgie-CIT*. Oct. 1999.
- ⁵⁶ JODY, B.J. et al. Recovery of recyclable materials from shredder residue. *EPD Congress 1994*. The Minerals, Metals & Materials Society. 1993.
- ⁵⁷ JODY, B.J., DANIELS, E.J., POMYKALA, Jr.J.A. Progress in recycling of automobile shredder residue. *EPD Congress 1996*. The Minerals, Metals & Materials Society. 1995.
- ⁵⁸ JODY, B.J. et al. Recovering recyclable materials from shredder residue. *JOM*. Feb. 1994.

-
- ⁵⁹ BURT, R.O., MILLS, C.. Gravity Concentration Technology. Amsterdam, Elsevier. c1984.
- ⁶⁰ FERRARA, G. et al. The influence of particle shape on the dynamic dense medium separation of plastics. International Journal of Mineral Processing. Vol. 59. p. 225-235. 2000.
- ⁶¹ LUZ, A. B., POSSA, M. V., ALMEIDA, S. L.. Tratamento de Minérios. Cetem/CNPq. Rio de Janeiro. 1998.
- ⁶² SAMPAIO, C. H., TAVARES, L.M.M.. Beneficiamento Gravimétrico. Editora UFRGS. 2001.
- ⁶³ BUCHAN, R., YARAR, B.. Recovering plastics for recycling by mineral processing techniques. JOM. p. 52-55. Feb. 1995.
- ⁶⁴ RUBIO, J. Carvão mineral – Caracterização e beneficiamento. Vol. 1. Nova Linha Artes Gráficas. 1988.
- ⁶⁵ JUNGSMANN, A., QUINDT, J.. Alljig® - technology for separation of building rubble and other secondary raw materials. In: Rewas, San Sebastian, Espanha. p. 367-379. 1999.
- ⁶⁶ GÜLDENPFENNIG, M., LÖHR, K.. Separation of mixed residual materials of equal density on the pneumatic table. Technik 36. Nr. 7. p. 314-320. 1995.
- ⁶⁷ FEARS, P.. Recycling plant expanded through non-ferrous metal separation. Aluminium 69. p. 121-122. 1993.
- ⁶⁸ FLETCHER, D., GERBER, R., MOORE, T.. An extended study of the electromagnetic separation of non-ferrous metals from insulators. IEEE Transactions on Magnetics. Vol 31. Nr. 6. p. 4187-4189. Nov. 1995.
- ⁶⁹ BUCH, R., DILLMANN, J., van der BEEK, A.. Reliable separation of nonferrous metals with eddy current separators. Technik 36. Nr. 9, p. 418-426. 1995.

-
- ⁷⁰ VRANCKEN, K.C. et al. Petrography and Leaching: Complementary Tools in Assessing the Environmental Risks of Secondary Raw Materials. In: REWAS, San Sebastian, Espanha, p.1373-1380. Sep. 1999.
- ⁷¹ Associação Brasileira de Normas Técnicas: Resíduos Sólidos. NBR 10004. Setembro 1987.
- ⁷² Associação Brasileira de Normas Técnicas: Lixiviação de Resíduos Sólidos. NBR 10005. Setembro 1987.
- ⁷³ Associação Brasileira de Normas Técnicas: Solubilização de Resíduos Sólidos. NBR 10006. Setembro 1987.
- ⁷⁴ United States Environmental Protection Agency. RCRA: Reducing Risk From Waste. Sep. 1997.
- ⁷⁵ LANGE, N.A.. Langes Handbook of Chemistry. Handbook Publishers, Inc. 1949.
- ⁷⁶ OHLWEILER, O.A.. Química Analítica Quantitativa. Vol. 2. Rio de Janeiro. 1976.
- ⁷⁷ STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER. USA. 1985.
- ⁷⁸ SCHOBENHAUS, C., COELHO, C.E.S.. Principais Depósitos Minerais do Brasil. Vol. III, DNPM. Brasília. 1988.
- ⁷⁹ SCHOBENHAUS, C., COELHO, C.E.S.. Principais Depósitos Minerais do Brasil. Vol. II, DNPM. Brasília. 1986.
- ⁸⁰ SCHOBENHAUS, C., COELHO, C.E.S.. Principais Depósitos Minerais do Brasil. Vol. IV, DNPM. Brasília. 1997.
- ⁸¹ URBACH, R., KRÜGER, J.. Dioxinentstehung und entfernung. In: Anais do 28. Metallurgische Seminar. p. 162-188. Bamberg. Alemanha. 1993.