



CONCENTRAÇÃO DE COBRE, ESTANHO E CHUMBO MEDIANTE
PROCESSAMENTO MECÂNICO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO
OBSOLETAS

Marcelle de Fátima da Silva

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Orientadores: Achilles Junqueira Bourdot Dutra
Marcelo Borges Mansur

Rio de Janeiro
Julho de 2016

CONCENTRAÇÃO DE COBRE, ESTANHO E CHUMBO MEDIANTE
PROCESSAMENTO MECÂNICO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO
OBSOLETAS

Marcelle de Fátima da Silva

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPODOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Examinada por:

Prof. Achilles Junqueira Bourdot Dutra, D. Sc.

Prof. Marcelo Borges Mansur, D. Sc.

Dr.^a Iranildes Daniel dos Santos, D. Sc.

Dr.^a Marisa Bezerra de Mello Monte, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JULHO DE 2016

Silva, Marcelle de Fátima

Concentração de cobre, estanho e chumbo mediante processamento mecânico de placas de circuito impresso obsoletas/ Marcelle de Fátima da Silva. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

XII, 70 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Achilles Junqueira Bourdot Dutra

Marcelo Borges Mansur

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 63-70.

1. Placas de Circuito Impresso. 2. Processamento Mecânico. 3. Recuperação de Metais. I. Dutra, Achilles Junqueira Bourdot *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. III. Título.

Aos meus amados pais Maria José e Magno, que tanto me apoiaram.

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores Prof. Achilles Junqueira Bourdot Dutra e Prof. Marcelo Borges Mansur pelos ensinamentos que levarei por toda minha vida profissional.

Ao amigo Pedro Medeiros, pelo auxílio na parte experimental, e aos amigos da pós-graduação que ajudaram cada um a sua maneira para que o curso de Mestrado fosse concluído com êxito.

Ao Grupo de Química Analítica do CETEM pela realização das análises químicas.

Ao CNPq pela bolsa integral concedida, que foi fundamental para a minha permanência no curso.

Ao Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da COPPE/UFRJ e ao LTM pela infra-estrutura necessária à realização desse trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

CONCENTRAÇÃO DE COBRE, ESTANHO E CHUMBO MEDIANTE
PROCESSAMENTO MECÂNICO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO
OBSOLETAS

Marcelle de Fátima da Silva

Julho/2016

Orientadores: Achilles Junqueira Bourdot Dutra
Marcelo Borges Mansur

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

A gestão correta do resíduo eletroeletrônico constitui um desafio para a sociedade moderna, pois o volume deste resíduo gerado através do descarte de equipamentos eletroeletrônicos cresce em paralelo com os avanços tecnológicos. Em um mercado cada vez mais escasso de matéria prima, a reciclagem dos materiais presentes no resíduo eletroeletrônico despertou interesse industrial devido à quantidade e variedade dos metais constituintes, principalmente nas placas de circuito impresso (PCI's). O presente trabalho investigou a recuperação dos metais cobre, estanho e chumbo e a separação do material cerâmico e polimérico presentes nas PCI's mediante processamento mecânico. As PCI's foram submetidas à quatro rotas de processamento com operações unitárias de moagem, separação magnética, concentração gravítica a seco (classificador em coluna zigue-zague) e via úmida. Após cominuição, peneiramento, separação magnética e análise química das frações obtidas, quatro faixas granulométricas foram encaminhadas para a operação de concentração. Os resultados obtidos indicaram que a sequência moagem seguida por separação magnética e concentração gravítica a seco em um classificador zigue-zague foi a estratégia mais eficiente na recuperação e separação, gerando um concentrado com 13,1% de cobre, 3,3% de estanho e 1,2% de chumbo, e separando 6,1% do material cerâmico e polimérico da massa total trabalhada.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

CONCENTRATION OF COPPER, TIN AND LEAD BY MECHANICAL
PROCESSING OF OBSOLETE PRINTED CIRCUIT BOARDS

Marcelle de Fátima da Silva

July/2016

Advisors: Achilles Junqueira Bourdot Dutra

Marcelo Borges Mansur

Department: Metallurgical and Materials Engineering

The proper management of electronic waste is a challenge for modern society, because the volume of this waste generated by the disposal of electronic equipment grows with technological advances. In a market increasingly scarce of raw materials, the recycling of materials in the electronics waste raised industrial interest due to the amount and variety of metallic constituents found in this equipment, mainly in printed circuit boards (PCB's). This study investigated the recovery of the metals copper, tin and lead and the separation of ceramic and polymeric materials present in the PCB's by mechanical processing. PCB's were submitted to four processing routes with unitary operations: milling, magnetic separation, dry gravity concentration (classifier zigzag column) and wet gravity concentration. After comminution, sieving, magnetic separation and chemical analysis of fractions obtained, four particle sizes were sent for the gravity concentration. The results indicated that the sequence milling followed by magnetic separation and dry gravity concentration in a zigzag classifier was the most efficient strategy for recovery and separation, producing a concentrate with 13,1% copper, 3,3% tin and 1,2% lead, and 6,1% separating the ceramic and polymeric material of the total mass worked.

SUMÁRIO

1– Introdução	1
2– Objetivos	4
3 – Revisão Bibliográfica	5
3.1 – Resíduos eletroeletrônicos	5
3.2 – Legislação sobre resíduos eletroeletrônicos	7
3.3 – Métodos de processamento para reciclagem de PCI's.....	10
3.3.1 – Pirometalurgia	10
3.3.2 – Hidrometalurgia	11
3.3.3 – Biometalurgia ou biolixiviação	12
3.3.4 – Eletrometalurgia	14
3.3.5 – Processamento mecânico	15
3.3.5.1 – Separação magnética.....	16
3.3.5.2 – Concentração gravítica.....	17
3.3.5.3 – Aeroclassificadores tipo zigue-zague	19
3.4 – Diagrama de Schytil	22
4 – Materiais e métodos	27
4.1 – Processamento mecânico	27
4.1.1 – Trituração	28
4.1.2 – Moagem	29
4.1.3 – Separação magnética	30
4.1.4 – Classificação granulométrica	31
4.1.5 – Concentração gravítica (imersão em água).....	31
4.1.6 – Concentração gravítica a seco (coluna em zigue-zague).....	32
4.2 – Caracterização das amostras	33
4.2.1 – Microscópio eletrônico de varredura (MEV).....	33

4.2.2 – Espectrofotometria de absorção atômica (AA).....	33
4.2.3 – Método picnométrico	34
5 – Resultados e Discussões.....	36
5.1– Desmantelamento manual,separação magnética,moagem e peneiramento .	36
5.2 – Concentração gravítica	45
5.2.1 – Concentração gravítica via úmida	48
5.2.2 – Concentração gravítica a seco em coluna zigue-zague.....	54
5.2.3 – Considerações finais	61
6 – Conclusões	62
Referências	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Composição média de uma placa de circuito impresso	2
Figura 2 - Classificador zigue-zague disponível no PEMM-COPPE-UFRJ e utilizado neste trabalho	20
Figura 3 - Fronteiras do diagrama de Schytil	25
Figura 4 – Fluxograma mostrando as diferentes estratégias de processamento mecânico aplicadas às PCI's no presente estudo	28
Figura 5 – Triturador de facas	29
Figura 6 – Moinho de facas (a) e abertura da saída do moinho (b).....	30
Figura 7 – Separador magnético.....	30
Figura 8 – Classificador zigue-zague	32
Figura 9 – Aspecto do produto das placas de circuito impresso após o separador magnético na corrente I (a) e na corrente II (b).....	38
Figura 10 – Porcentagem de material solúvel e insolúvel em água régia presente na fração magnética da corrente II e distribuição das espécies metálicas cobre, estanho e chumbo	38
Figura 11– Distribuição granulométrica percentual da massa total das correntes I e II após a moagem	39
Figura 12 – Porcentagem do material solúvel e insolúvel em água régia presente nas correntes I e II.....	40
Figura 13– Distribuição das espécies metálicas cobre, estanho e chumbo na fração solúvel por faixa granulométrica das correntes I e II	41

Figura 14 – Imagens analisadas por MEV-EDS nas frações granulométricas estudadas: (a) > 2,00 mm; (b) 1,2 – 2,00 mm; (c) 0,85 – 1,2 mm; (d) 0,71 – 0,85 mm; (e) 0,5 – 0,71 mm; (f) 0,3 – 0,5 mm; (g) 0,125 – 0,3 mm; e (h) < 0,125 mm.....	47
Figura 15 – Resultado da concentração gravítica em percentuais de massa total das amostras para as rotas 1 e 3	49
Figura 16 – Porcentagem de material solúvel e insolúvel em água régia presentes nas frações leve e pesada das rotas 1 e 3, por faixa granulométrica.....	50
Figura 17 – Distribuição das espécies metálicas cobre, estanho e chumbo na fração solúvel por faixa granulométrica das rotas 1 e 3	51
Figura 18 – Diagrama de Schytil da rota 2 para a faixa granulométrica de 0,85-1,2 mm	55
Figura 19 – Resultados da concentração gravítica em coluna zigue-zague em percentuais de massa total das amostras para rota 2 e rota 4.....	56
Figura 20 - Porcentagem de material solúvel e insolúvel em água régia presentes nas rotas 2 e 4.....	57
Figura 21 - Distribuição das espécies metálicas cobre, estanho e chumbo na fração solúvel por faixa granulométrica das rotas 2 e 4	58
Figura 22 - Resultados obtidos aplicando-se as rotas de processamento propostas	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos separadores magnéticos	16
Tabela 2 – Resultados obtidos com a variação do ângulo dos estágios do classificador zigue-zague	21
Tabela 3 - Relação entre C_d e o número de Reynolds	25
Tabela 4 – Balanço de massa total das etapas de separação magnética, moagem e peneiramento das correntes I e II.....	34
Tabela 5 – Distribuição das frações insolúveis (polímeros e cerâmicos) e solúveis (metais cobre, estanho, chumbo e outros) na corrente I	42
Tabela 6 – Distribuição das frações insolúveis (polímeros e cerâmicos) e solúveis (metais cobre, estanho, chumbo e outros) na corrente II	43
Tabela 7 – Densidade relativa por faixa granulométrica, segundo o método picnométrico	48
Tabela 8 – Distribuição das frações insolúvel (polímeros e cerâmicos) e solúvel (metais cobre, estanho, chumbo e outros) na rota 1	52
Tabela 9 - Distribuição das frações insolúvel (polímeros e cerâmicos) e solúvel (metais cobre, estanho, chumbo e outros) na rota 3	53
Tabela 10 – Vazão de alimentação de ar para rota 2 e 4 no classificador zigue-zague em função da faixa granulométrica (teórica e experimental)	55
Tabela 11 - Distribuição das frações insolúvel (polímeros e cerâmicos) e solúvel (metais cobre, estanho, chumbo e outros) na rota 2	59
Tabela 12 - Distribuição das frações insolúvel (polímeros e cerâmicos) e solúvel (metais cobre, estanho, chumbo e outros) na rota 4	60

1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico trouxe muitas vantagens para a sociedade de consumo moderna, que se tornou dependente de aparelhos eletroeletrônicos. O curto tempo de vida destes produtos resulta na geração de um volume significativo de resíduo, da ordem de 42 milhões de toneladas de lixo eletrônico por ano no mundo, segundo relatório 2014 do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), oriundo principalmente dos países desenvolvidos (BALDÉ *et al.*, 2015).

O descarte incorreto dos resíduos eletroeletrônicos consiste em um sério problema ambiental. Em diversos países, incluindo o Brasil, tais resíduos são dispostos em aterros sanitários e aterros controlados, incinerados ou descartados a céu aberto. O desrespeito às leis que tratam da gestão de resíduos sólidos pode acarretar em danos à saúde humana e impactos ao meio ambiente. No Brasil, o gerenciamento de resíduos sólidos deve obedecer à Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, aprovada pela lei nº 12305, de 02/08/2010); e, mais especificamente no caso de resíduos eletroeletrônicos, a norma ABNT NBR 16156 (2014), que estabelece requisitos para atividade de manufatura reversa. Isto porque na sucata eletrônica são encontrados materiais e componentes passíveis de reutilização e/ou reciclagem que podem ser inutilizados se geridos incorretamente, impossibilitando, portanto, a sua reciclagem.

A placa de circuito impresso (PCI) é um componente comum em qualquer equipamento eletroeletrônico e, como pode ser verificado na Figura 1, contém frações consideráveis de materiais cerâmicos ($\approx 50\%$), poliméricos ($\approx 20\%$) e metálicos ($\approx 30\%$). Dentre os metais que constituem as PCI's tem-se, por exemplo, chumbo, cádmio e arsênio, que são metais tóxicos altamente contaminantes, e também ouro, prata, cobre e níquel, que possuem valor comercial agregado, além de outras espécies metálicas cujo tipo e teor podem variar a depender da finalidade da placa. A fim de diminuir a toxicidade e a contaminação ambiental em regiões pobres do planeta, países como os da União Européia, Japão e China criaram, nos últimos anos, medidas que priorizam mudanças nos processos produtivos, retirando substâncias perigosas da composição dos equipamentos eletroeletrônicos, e a redução da movimentação de resíduos entre países desenvolvidos para países em desenvolvimento. Embora o transporte do lixo eletrônico seja proibido internacionalmente, esta prática ainda continua sendo realizada de maneira

clandestina para países africanos e asiáticos misturado a carregamentos de eletrônicos de segunda mão importados de países desenvolvidos (MATTHEUS, 2016).

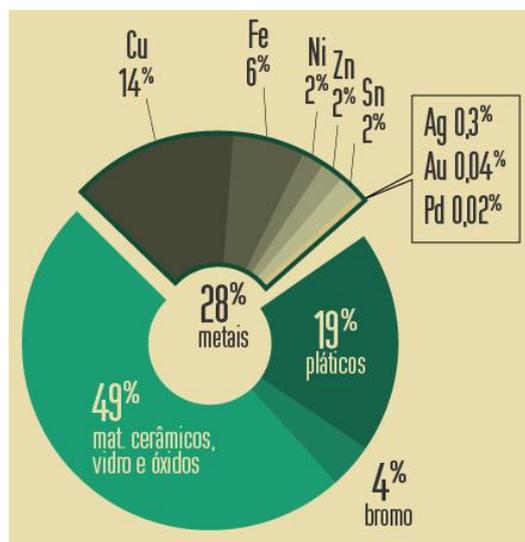


Figura 1 - Composição média de uma placa de circuito impresso (MATTHEUS, 2016).

Diante deste contexto, é importante que estudos continuem sendo feitos buscando viabilizar a reciclagem dos metais presentes nas PCI's, de maneira cada vez mais simples operacional e economicamente. Esta ação é importante devido às características de passivo ambiental deste resíduo e o interesse econômico em alguns metais, que podem ser reinseridos nos processos industriais como matéria-prima.

Diversos métodos para a recuperação de metais presentes nas PCI's encontram-se apresentados na literatura, envolvendo separações física e mecânica, processos hidrometalúrgicos, pirometalúrgicos e/ou biológicos. A eficiência de recuperação e a separação dos metais podem ser favorecidas se as PCI's forem processadas inicialmente visando à remoção das frações de materiais cerâmicos e plásticos que, conforme a Figura 1 pode chegar a 70% do material a ser tratado. E, dependendo das operações empregadas, é possível contribuir para a diminuição no custo de operação total da rota.

Assim, no presente trabalho, diferentes métodos de processamento mecânico, comuns em tratamento de minérios, foram investigados para concentrar cobre, estanho e chumbo presentes em PCI's de computadores obsoletos. Após desmantelamento manual

das placas e fragmentação em um triturador de facas, o material passou por estágios de moagem, separação magnética, peneiramento, concentração gravítica via úmida e a seco. O caráter inovador do trabalho consiste na utilização do classificador zigue-zague como principal instrumento de concentração dos metais de interesse a seco. Com isso, minimizam-se problemas de corrosão dos materiais processados, eliminando custos adicionais de secagem, etc.

2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver uma rota processual mecânica de forma eficiente e sustentável para a obtenção de uma corrente concentrada nos metais cobre, estanho e chumbo, a partir de resíduos de placas de circuito impresso, provenientes de computadores obsoletos.

Os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- Caracterização do resíduo nas suas frações principais (cerâmica, polimérica e metálica), incluindo detalhamento da caracterização química da fração metálica;
- Avaliação da configuração da rota: definição da melhor sequência de disposição das operações unitárias estudadas e a contribuição de cada operação na concentração da fração metálica;
- Avaliação da concentração gravítica via úmida e a seco: identificação das faixas granulométricas que concentram a maior fração metálica mediante ao uso de um classificador zigue-zague operado a ar e por diferença de densidade em água.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Resíduos eletroeletrônicos

De acordo com SAITO (1994), o setor eletroeletrônico foi o braço da indústria que mais se desenvolveu no final do século XX. De fato, o uso de computadores foi crucial para o estabelecimento da era da informação, também conhecida como era digital ou era tecnológica, período pós-industrial a partir de 1980. WANG *et al.* (2009) constataram que o desenvolvimento da ciência e tecnologia, assim como a alta demanda do mercado consumidor por equipamentos elétricos e eletrônicos aumentou rapidamente, o que tornou esses equipamentos parte necessária da vida das pessoas. Visão compartilhada por NETO *et al.* (2016), de que nos últimos vinte anos o cenário econômico e social do planeta mudou completamente devido a ampla comercialização de eletroeletrônicos. Estes autores apresentam também os problemas que a sociedade atual enfrenta em consequência das ações realizadas nas últimas décadas. Surge então o resíduo eletroeletrônico, em razão do curto tempo de vida útil destes aparelhos e a elevada quantidade de dispositivos obsoletos descartados. A sociedade atual é caracterizada pelo consumo.

Atualmente, são gerados 41,8 milhões de toneladas de resíduo eletroeletrônico no mundo, e os Estados Unidos é o maior gerador deste tipo de resíduo, com uma produção de 7,1 milhões de toneladas de resíduos eletroeletrônicos em 2014. Dentre os países do continente americano, em classificação per capita, tem-se EUA (22,1 kg/hab), Canadá (20,4 kg/hab) e Bahamas (19,1 kg/hab). O Brasil gerou no mesmo ano 1,4 milhões de toneladas de resíduo eletroeletrônico, apresentando uma produção per capita de 7 kg deste resíduo (BALDÉ *et al.*, 2015).

O setor de informática não era classificado como uma indústria potencialmente poluidora, no entanto, com produtos progressivamente mais inovadores e composição química variada, ciclos de vida cada vez menores e volume de resíduo eletroeletrônico crescente, esta visão mudou. O impacto ambiental deste resíduo, quando disposto de maneira inadequada, ou seja, sem tratamento, é considerável. A consequente perda econômica dos metais contidos nos equipamentos eletroeletrônicos é outro estímulo para combater o descarte incorreto e incentivar a reciclagem (MATTOS, 2008).

A demanda por novas fontes de energia e matéria prima é crescente, assim como locais para descartar a quantidade de resíduos eletroeletrônicos gerada. O custo para dispor resíduos corretamente é elevado, e isto é sempre repassado para o consumidor. Assim, a consciência ambiental da sociedade despertou para soluções sustentáveis como reuso, reciclagem e recuperação de materiais (PEIRCE *et al.*, 1998).

Resíduo eletroeletrônico compreende todo material resultante do descarte de equipamentos elétricos e eletrônicos obsoletos ou defeituosos, seja o equipamento completo, partes ou peças. Constituem exemplos de produtos eletroeletrônicos (NBR 16.156/2014): eletrodomésticos, equipamentos de informática e telecomunicações, equipamentos de iluminação, ferramentas eletroeletrônicas, brinquedos e equipamentos de esporte e lazer, equipamentos eletrônicos para uso médico, e outros. Com mais de 1.000 substâncias diferentes presentes nestes resíduos, pode-se destacar elementos com valor comercial agregado como cobre, ouro, prata, paládio e terras raras, e tóxicos como chumbo, mercúrio, arsênio, cádmio, selênio, cromo hexavalente e retardantes de chamas, que quando incinerados produzem dioxinas (WIDMER *et al.*, 2005).

As placas de circuito impresso (PCI's) são componentes essenciais em qualquer equipamento eletroeletrônico. Existem diferentes tipos de placas: rígidas, flexíveis, multicamadas. Sua composição depende do ano de fabricação, marca e funcionalidade (HOFFMANN, 1992; SHRIVASTAVA, 2004). A heterogeneidade em sua composição dificulta a recuperação dos diversos materiais utilizados em sua fabricação, principalmente os metais que são de interesse econômico e os que causam efeitos prejudiciais ao meio ambiente (VEIT, 2006). Mas, de uma maneira geral, há três frações principais: materiais cerâmicos, poliméricos e metais. Com relação aos metais, estes podem apresentar interesse econômico e/ou ambiental.

De acordo com MORAES (2010), as PCI's de celulares possuem 24% de cerâmicas, 12,7% de polímeros e 63,3% de metais. Estes valores diferem consideravelmente daqueles apresentados por MATTHEUS (2016), considerando-se PCI's em geral (vide Figura 1). Porém, independentemente disto, segundo LEGARTH (1997), o teor de metais presentes nas PCI's é normalmente superior ao teor encontrado nos minérios. Por exemplo, em cada tonelada de PCI's é possível recuperar 17 g de

ouro, enquanto que na mineração convencional a quantidade de ouro extraída varia de 6-12 g por tonelada de minério (MATTHEUS, 2016).

Os metais tóxicos encontrados nas PCI's, como mercúrio, chumbo, cádmio e arsênio, podem causar séria contaminação do meio ambiente e riscos à saúde humana. Este fato despertou preocupações nos governos e órgãos ambientais de países em desenvolvimento da África, Ásia e América do Sul, devido à importação de resíduos eletroeletrônicos oriundos de países desenvolvidos. Do montante de 7,1 milhões de toneladas de resíduos eletroeletrônicos produzidos pelos EUA em 2014, 8,5% foram exportados para o México, Venezuela, Paraguai e China (BALDÉ *et al.*, 2015). Atualmente esta prática é proibida internacionalmente, daí a necessidade de coibir a prática clandestina.

Neste cenário, a reciclagem e a recuperação dos materiais constituintes das PCI's, principalmente os metais, é a alternativa ambientalmente correta, viável e sustentável para a resolução do problema de descarte deste tipo de resíduo. A implementação de práticas de reuso/reciclagem pode reduzir o volume de material a ser disposto em aterros industriais e constituir fonte de matéria prima secundária para o setor industrial (GERBASE, 2012).

3.2 Legislação sobre resíduos eletroeletrônicos

A Convenção da Basileia sobre o Controle de Movimentos Transfronteiriços de Resíduos Perigosos e seu Depósito, concluída em 22 de março de 1989, é o documento internacional que rege a regulamentação do movimento de resíduos eletroeletrônicos. Ele estabelece o controle e a cooperação da exportação, o trânsito de resíduos perigosos, e responsabiliza o Estado de assegurar que seja mínima a geração de resíduos, e os geradores a transportar e dispor de maneira ambientalmente adequada os resíduos (CONVENÇÃO BASILEIA, 1989). Este tratado foi internalizado por meio do Decreto nº 875, de 19 de julho de 1993, e também regulamentado pela Resolução CONAMA nº 452, de 02 de julho de 2012. A Política Nacional de Resíduos Sólidos proíbe definitivamente a importação de resíduos perigosos em seu Art. 49, ainda que para tratamento, reforma, reuso, reutilização ou recuperação (PNRS, 2010).

As diretivas europeias foram criadas com a finalidade de prevenir a geração de resíduos eletroeletrônicos, impulsionar a reciclagem, favorecer a reutilização e limitar o emprego de substâncias tóxicas, como chumbo, mercúrio e retardantes de chama (MIGUEZ, 2012). Criada em 2003, a diretiva WEEE (*Waste Electrical and Electronic Equipment*) 2002/96/CE define alvos para a coleta, tratamento, recuperação e reciclagem de produtos eletroeletrônicos. A diretiva nº 2012/19/EU, de 4 de julho de 2012, revogou e reformulou a WEEE, fomentando a produção de equipamentos que possibilitem a reparação, atualização, reutilização, desmontagem e reciclagem de forma simplificada (XAVIER, 2014). A diretiva RoHS (*Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment*) nº 2002/95/CE, instituiu a alteração de substâncias na confecção de produtos, tendo em vista os problemas ambientais causados no fim da vida útil destes resíduos quando são dispostos e a reciclagem. Esta diretiva foi revogada em 3 de janeiro de 2013 pela diretiva nº 2011/65/EU. Nesta, os países membros da Comunidade Europeia devem assegurar que os equipamentos eletroeletrônicos não contenham determinadas substâncias acima da concentração máxima determinada em seu Anexo II (XAVIER, 2014).

No continente asiático, onde se encontram os maiores receptores de resíduos eletroeletrônicos de países europeus e norte-americanos, a legislação ambiental é praticamente inexistente. Na China há a chamada *Administration on the Control of Pollution Caused by Electronic Information Products*, lei que está em vigor desde 2006, redigida nos padrões da diretiva RoHS da União Europeia, e que estabelece as substâncias tóxicas contidas nos equipamentos eletroeletrônicos produzidos e importados, e critérios para produção de equipamentos mais eficientes e passíveis de reciclagem (KIRSCHINER, 2007). A lei *Home Appliance Recycling Law* está em vigor desde 2001 no Japão. Esta lei exige dos fabricantes e importadores a coleta e reciclagem de seus equipamentos, estipula metas de reciclagem em torno de 50-60%, e o pagamento pelo consumidor de uma taxa para coleta, transporte e descarte de seus produtos (RECYCLING IN JAPAN, 2003).

Atualmente no Brasil a lei 12.305 de 02 de agosto de 2010 – Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) – estabelece normas sobre a redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como trata da disposição final destes rejeitos. Como objetivos principais, tem-se a gestão integrada dos diversos tipos de

resíduos gerados, a diminuição do uso dos recursos naturais, a intensificação de ações na educação ambiental e o aumento da reciclagem no país. A PNRS estabelece a responsabilidade compartilhada durante o ciclo de vida do produto entre o setor privado, o poder público e a sociedade civil, e a implantação da logística reversa. Em seu Art. 33, esta lei define e reforça a prática de logística reversa como instrumento eficaz para o gerenciamento dos resíduos sólidos, contemplando todos os aspectos que viabilizem a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento ou outra destinação final ambientalmente adequada, ou seja, promover ações para assegurar que o fluxo de resíduos seja direcionado para uma cadeia produtiva, garantindo a sustentabilidade do ciclo (MIGUEZ, 2012; XAVIER, 2014).

Há também as resoluções do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), que tratam de critérios e padrões relativos à proteção ambiental e ao uso sustentável dos recursos naturais. A Resolução nº 401 de 04 de novembro de 2008, estipula as concentrações máximas de chumbo, cádmio e mercúrio para pilhas e baterias, e os padrões para o gerenciamento ambientalmente adequado. Instaura que fabricantes, importadores e assistências técnicas autorizadas devem receber dos consumidores as pilhas e baterias usadas, e que deverão encaminhar este resíduo, em sua totalidade, para destinação ambientalmente adequada, de responsabilidade do fabricante ou importador. A Resolução nº 452/2012 do CONAMA dispõe sobre os procedimentos de controle da importação de resíduos, conforme as normas adotadas pela Convenção da Basileia, e reafirma a proibição da importação dos Resíduos Perigosos – Classe I (resíduos que tenham como elementos constitutivos: compostos de cobre, zinco, mercúrio, chumbo, dentre outros) e de rejeitos, em todo o território nacional, de acordo com a PNRS.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), em sua Norma nº 10.004 de 2004 estabelece a classificação de resíduos sólidos. Devido às suas características de toxicidade e periculosidade, os resíduos eletroeletrônicos são classificados como resíduos classe I – Perigosos. A Norma Brasileira (NBR) nº 16.156 de 2014, trata sobre a logística reversa dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos. Seus principais requisitos são a aplicação do princípio de conservação de massa, visando contabilizar todo resíduo eletroeletrônico que entra e sai do processo de reciclagem e sua rastreabilidade, a segurança de dados, que através da descaracterização protege a marca,

e as informações de empresas ou qualquer indivíduo que estejam contidas no resíduo, e também, a proteção ambiental e segurança e saúde ocupacional.

O estado do Rio de Janeiro não possui legislação específica para tratar de resíduos eletroeletrônicos, porém, existem os projetos de lei nº 1937/2004 e nº 56/2015, que dispõem, respectivamente, sobre o estabelecimento de normas e procedimentos para o gerenciamento e destinação de resíduo tecnológico, e sobre coleta de resíduo eletroeletrônico (ALERJ, 2015).

3.3 Métodos de processamento para reciclagem de PCI's

O tratamento de PCI's é complexo devido à sua composição heterogênea. O conteúdo metálico, além de variado em quantidade e teor, a depender da finalidade da PCI, encontra-se disperso entre frações de materiais cerâmicos e poliméricos, sendo necessária sua separação prévia para a recuperação dos metais. Estudos recentes foram publicados abordando tanto a recuperação dos metais de interesse econômico contidos nas placas, quanto os impactos ambientais causados pelo seu descarte incorreto (YAMANE, 2012; AKCIL *et al.*, 2012).

As tecnologias usadas para a reciclagem das PCI's são baseadas em processos físicos, químicos, biológicos e térmicos. Os tratamentos convencionais envolvem processamento mecânico, pirometalurgia, hidrometalurgia e eletrometalurgia, além do uso eventual da biometalurgia. Dentre os tratamentos possíveis, o tratamento mecânico é o menos agressivo ao meio ambiente e aos seres humanos por gerar menor quantidade de resíduos contaminantes (BERNARDES, 2009), além de constituir etapa necessária complementar aos demais tratamentos. Um breve levantamento sobre estes tipos de tratamento aplicado às PCI's é apresentado a seguir.

3.3.1 Pirometalurgia

Tratamento tradicional empregado na recuperação de metais não-ferrosos e metais preciosos de resíduos eletroeletrônicos, os processos pirometalúrgicos estão associados ao uso de altas temperaturas, geralmente na faixa entre 500 e 1600°C, para extração e refino de metais. Na recuperação dos materiais presentes nas PCI's, pode ser usado para a formação de compostos, produção e purificação de metais, principalmente cobre (GUPTA, 2003; MENETTI, 1996; ESPINOSA, 2009).

O processamento pirometalúrgico de PCI's consiste essencialmente em um mecanismo de concentração de metais em uma fase metálica, que pode ser submetido a refinamento eletrolítico, para aumentar os níveis de pureza, e a fase escória, que também sofre posterior refino para recuperação dos materiais preciosos (AKCIL *et al.*, 2012; HOFFMANN, 1992). Este processo tem como desvantagens o elevado consumo de energia e apresenta também problemas associados à poluição ambiental, principalmente aqueles relacionados com a poluição atmosférica, pois a queima dos resíduos eletroeletrônicos pode resultar na geração de dioxinas e furanos, devido à presença de retardadores de chama, metais voláteis e pó metálico. Por trabalhar em temperaturas elevadas, a pirometalurgia é aplicada a altas taxas de produção, para manter-se viável economicamente. A principal vantagem deste processo é que qualquer tipo de sucata eletrônica pode ser processado, não sendo demandado tratamento prévio (VEIT, 2005).

3.3.2 Hidrometalurgia

Na hidrometalurgia, o processo de separação ocorre através de reações de dissolução do material sólido em soluções lixiviantes, ácidas ou alcalinas. Para torná-lo econômico e diminuir o volume de material a ser tratado, faz-se necessário o pré-tratamento mecânico das PCI's. Como os elementos metálicos presentes nas PCI's encontram-se frequentemente envolvidos por materiais poliméricos e/ou cerâmicos, é necessário o tratamento mecânico para expor os metais à ação do agente lixiviante. O material obtido, então concentrado em metais e pobre em plásticos e/ou cerâmicos, é encaminhado à etapa de lixiviação dos metais utilizando-se um reagente apropriado. Em seguida, faz-se a purificação da lixivia obtida e, finalmente, a recuperação dos metais dissolvidos (SUM, 1991).

Para realizar a extração de estanho e cobre de PCI's, CASTRO & MARTINS (2009) procederam a desmontagem, corte e moagem das placas, para então serem submetidas ao processo de lixiviação. Dentre as soluções aquosas utilizadas, verificou-se que a porcentagem de estanho e cobre extraída com 2,18 N H₂SO₄ foi baixa (2,7% de Sn e menos de 0,01% de Cu), enquanto que com uma solução de 3.0 N HCl + 1.0 N HNO₃ resultou em maiores extrações simultâneas destes metais (98% de Sn e 93% de

Cu). Observa-se, pois, que a lixiviação requer o uso de soluções ácidas concentradas para ser eficiente.

MORAES (2010) afirma que para ocorrer a dissolução do cobre, a solução de lixiviação deve apresentar características ácidas ($\text{pH} < 4$) e o potencial da reação deve estar acima de 0,4 V. Este potencial pode ser alcançado adicionando-se um agente oxidante, como o peróxido de hidrogênio, por exemplo.

CALDAS *et al.* (2015) realizaram ensaios de lixiviação sequencial de PCI's a 75°C utilizando ácido sulfúrico, ácido sulfúrico em meio oxidante e ácido nítrico. Na lixiviação ácida, somente 7% dos metais foram solubilizados em ácido sulfúrico 1 M. O cobre não foi extraído nesta etapa, porém houve uma extração de 29,5% de estanho. Durante a lixiviação ácida em meio oxidante, adicionou-se 10 mL peróxido de hidrogênio (130 volumes) a cada 30 minutos, e então foi possível solubilizar 21,5% dos metais, apresentando 62,7% e 2,1% de extração de cobre e estanho, respectivamente. Por fim, com a lixiviação em ácido nítrico, completou-se a total extração do cobre, com 37,3%. Para o estanho, um percentual de 34,2% foi obtido ao final da extração.

Em relação aos processos pirometalúrgicos, os processos hidrometalúrgicos oferecem relativamente baixo custo de capital, baixo consumo de energia e possível regeneração dos reagentes, aplicação em pequena escala, redução dos impactos ambientais devido à não geração de gases tóxicos e particulado, dentre outras vantagens. Como desvantagens, porém, têm-se grandes volumes de soluções, efluentes tóxicos com metais corrosivos e geração de resíduos sólidos (SUM, 1991; GLOE, 1990).

3.3.3 Biometalurgia ou biolixiviação

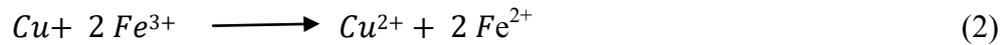
A biometalurgia utiliza as interações entre os microorganismos e minerais para recuperar metais de interesse mediante solubilização em meio aquoso, daí ser conhecido também por biolixiviação. O método foi originalmente desenvolvido para a lixiviação de minérios, mas pode ser empregado também no tratamento de resíduos eletroeletrônicos, como é o caso das PCI's (GUPTA, 2003; WILLSCHEER *et al.*, 2007; YAMANE *et al.*, 2011).

Quando comparado aos métodos convencionais, a biolixiviação apresenta vantagens como baixos custos operacionais, baixo consumo de energia, menor

necessidade de mão de obra especializada e eficiência na desintoxicação dos efluentes. Como desvantagens principais, tem-se o longo período requerido para a ocorrência da biolixiviação (já que ocorre em baixos níveis de temperatura para permitir a sobrevivência dos microorganismos, o que resulta em velocidade de reação mais lenta que no processo hidrometalúrgico convencional), além da necessidade do metal estar exposto para o possível ataque microbiano (VEIT, 2001; MARTINS, 2007; KARWOWSKA *et al.*, 2014).

No estudo realizado por KARWOWSKA *et al.* (2014), utilizando-se uma cultura com bactérias oxidantes de enxofre (*Acidithiobacillus sp.*) e bactérias produtoras de biossurfatantes (*Bacillus subtilis* e *Bacillus cereus*), verificou-se que a biolixiviação ácida (pH 2-3,5) é mais eficaz na recuperação de metais de resíduos eletrônicos, porém, os metais podem ser igualmente recuperados em pH neutro pela cultura mista de bactérias. Ao final do processo, a porcentagem de recuperação dos metais zinco, níquel, cobre, chumbo, cromo e cádmio foi de 48%; 48,5%; 53%; inferior a 0,5%; 23% e 93%, respectivamente. Constataram ainda que o processo de biolixiviação é influenciado pelo aeração e temperatura, que dependerá do tipo de bactéria e do metal a ser extraído do resíduo.

CHEN *et al.* (2015) afirmaram que após biolixiviar resíduo de PCI's com teor de 24,8% de cobre, por 28 dias, em uma coluna contendo bactérias *Acidithiobacillus ferrooxidans*, houve uma recuperação de 94,8% deste metal. O método consistiu primeiramente na remoção dos componentes eletrônicos e trituração das PCI's. Antes da lixiviação, o material foi lavado com ácido sulfúrico (pH 2). O meio de cultura das bactérias foi composto por sais minerais [(NH₄)₂SO₄ 2,0 g/l; K₂HPO₄ 0,25 g/l; MgSO₄.7H₂O 0,25 g/l; KCl 0,1 g/l; Ca(NO₃)₂ 0,01 g/l] e 22,2 g/l de FeSO₄.7H₂O. Sendo este meio inserido na coluna para realizar a biolixiviação, com temperatura mantida a 30 °C e o pH monitorado e controlado (pH ótimo = 2) com adição apropriada de 5,0 M de H₂SO₄. Observou-se que a presença de ferro (Fe³⁺) interfere na oxidação do cobre, e conseqüentemente no processo de biolixiviação, pois o Fe²⁺ é oxidado a Fe³⁺ em meio ácido na presença dos microorganismos (Equação 1) e o cobre (Cu⁰), presente no resíduo eletrônico, é oxidado pelo Fe³⁺, enquanto o próprio Fe³⁺ é reduzido a Fe²⁺ (Equação 2), realimentando o processo. Portanto, a variação da concentração de Fe³⁺ deve ser considerada para esse tipo de processo.



3.3.4 Eletrometalurgia

Eletrometalurgia é o processo de produção de metais através da eletrólise. O princípio envolve as reações de oxidação e de redução, não espontâneas. No refino eletrolítico, o metal presente em um material dissolve-se sob a forma de íons metálicos e é eletrodepositado no cátodo na forma pura (SCHWEICHARDT, 2006; ELLINGHAM, 2010).

A maioria dos processamentos eletroquímicos associados com a reciclagem de sucatas eletrônicas constituem etapas de refinamento para recuperação do metal puro. Se os metais forem concentrados através de hidrometalurgia, eles podem ser eletrodepositados diretamente das soluções aquosas sobre o cátodo. Para realizar este processo o metal deve estar em uma solução condutora (eletrólito), permitindo a obtenção de cátodos, a partir dessas soluções aquosas (CIMINELLI, 2007; SUM, 1991).

No trabalho realizado por GUIMARÃES (2012), cobre presente em resíduos de PCI's com teor inicial de 14% foi recuperado em 80% após o tratamento eletrometalúrgico. O aparato consistiu em uma célula de acrílico com uma cesta e uma chapa de aço em seu interior, contendo um sistema de agitação. No recipiente, foram adicionados 200 mL de uma solução contendo 180 g/L de H₂SO₄ e 40 g/L de Cu²⁺. Após concentração realizada com um classificador tipo zigue-zague, o material com granulometria entre 0,2 e 0,4 mm foi inserido na cesta de aço e foi aplicada uma tensão de 0,7 V. O cobre presente no material se oxidou, introduzindo íons de Cu²⁺ na solução que, posteriormente, eram depositados na superfície da chapa de aço, concluindo o processo de recuperação.

O método eletroquímico foi empregado por VEIT *et al.* (2006) na recuperação de cobre presentes em PCI's. Na primeira etapa do estudo sucedeu-se o processamento mecânico das placas, empregando um moinho de facas na cominuição do material após o demantelamento manual. Na etapa seguinte, para obtenção do metal puro, utilizou-se

um processo eletroquímico em solução de ácido sulfúrico 20% e água régia 20%. Foi obtida recuperação de 99,5% de Cu com o ácido sulfúrico e 99,3% com água régia; e para o estanho, 0,7% e 2,2%, respectivamente. O teor de chumbo recuperado com ácido sulfúrico foi de 0,4% e com água régia de 0,9%.

3.3.5 Processamento mecânico

Exceto no processamento pirometalúrgico das PCI's, todos os demais requerem a remoção das frações de materiais plásticos e cerâmicos a fim de acessar os metais presentes no resíduo. Por esta razão, o processamento mecânico é sempre requisitado como um pré-tratamento deste tipo de material (VEIT *et al.*, 2008), constituindo, pois, uma rota híbrida. Este processo físico envolve uma série de operações unitárias, típicas de tratamento de minérios, podendo-se dividi-las em operações de fragmentação, classificação e separação/concentração.

A fragmentação consiste em um conjunto de técnicas que objetivam a redução de tamanho de um sólido. Para materiais heterogêneos, como as PCI's, a fragmentação visa a liberação dos metais de interesse e a redução até dimensões requeridas para os métodos posteriores de recuperação (LUZ *et al.*, 2010; YOVANOVIC, 2004). No processo de moagem das PCI's, moinhos de faca e de martelo são frequentemente utilizados para reduzir o material abaixo de 3 mm.

Na etapa de classificação, as partículas do material obtidas após a cominuição são classificadas de acordo com o seu tamanho por peneiramento, separando-as em frações de tamanhos distintos, possibilitando a distribuição granulométrica das partículas (XIU, 2013; SOUZA, 2010; VEIT *et al.*, 2006, CARRISSO & CORREIA, 2004). O peneiramento permite separar o material somente pelo tamanho das partículas e não identifica o material por qualquer outra propriedade. Algumas vezes, após essa etapa, já é possível obter frações enriquecidas em certos materiais, os quais podem ser separados da corrente principal (HAYES, 1993).

Dentre as diversas operações de separação/concentração disponíveis, citam-se a separação magnética, a concentração gravítica via úmida e a seco, dentre outras.

3.3.5.1 Separação magnética

A separação magnética é uma operação unitária utilizada industrialmente no beneficiamento mineral e de materiais visando a concentração e/ou purificação a partir da susceptibilidade magnética do material. Esta característica determina como o material se comporta na presença de um campo magnético, se atraídas ou repelidas, classificando-o em três categorias: (i) ferromagnéticos, materiais que possuem elevada magnetização; (ii) paramagnéticos, aqueles que se imantam fracamente; e (iii) diamagnéticos, são os materiais que possuem susceptibilidade magnética negativa, o que causa repulsão ao campo (LUZ *et al.*, 2010; CALLISTER, 2003; RIBEIRO, 2000).

O processo de separação magnética pode ser realizado a seco ou a úmido, dependendo da granulometria do material. A operação pode ser regulada em alta e baixa intensidade de campo e de corrente. Campos com baixas intensidades são empregados na separação de materiais com alta susceptibilidade magnética daqueles com susceptibilidade baixa. Já os equipamentos que operam com alta intensidade são utilizados para separar substâncias paramagnéticas de diamagnéticas (MAIA, 2011; JUNCA, 2009; VEIT, 2001).

Os tipos de separadores magnéticos, classificados de acordo com a intensidade do campo magnético e o gradiente de campo, encontram-se mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação dos separadores magnéticos.

Classificação	Intensidade de campo (Gauss)	Gradiente de campo (Gauss/cm)	Granulometria mínima (mm)	
			Separação a seco	Separação a úmido
Baixa intensidade	600 – 1.000	500	0,105	0,045
Alta intensidade	1.000 – 10.000	500	0,075	0,075
Alto gradiente	10.000 – 50.000	< 1.000	0,045	0,001

Fonte: LUZ, *et al.* (2010).

Para empregar uma via hidrometalúrgica na recuperação de metais valiosos presentes em PCI's, LEE (2009) utilizou primeiramente o processamento mecânico para concentrar os metais de interesse. As placas foram trituradas em um moinho de selo e,

em seguida, classificadas granulometricamente. A fração com tamanho abaixo de 5 mm foi separada por gravidade utilizando um classificador zigue-zague. Já a fração acima de 5 mm foi submetida a dois processos de separação magnética, o primeiro realizado com o equipamento operando a 700 Gauss, e o segundo foi aplicado ao material não magnético proveniente da primeira separação, com um separador operando a 3000 Gauss. Na primeira separação foi recuperado 83% de ferro e níquel na fração magnética, enquanto 92% do cobre foi recuperado na fração não magnética. Na segunda separação, observou-se que a quantidade de ferro e níquel diminuiu de 76% para 56% e a recuperação acumulada de cobre também caiu, embora a concentração de cobre tenha aumentado de 71,6% para 75,4%. A fração não magnética apresentou cerca de 3-20% de ferro e níquel, provavelmente porque esses metais encontram-se em partículas paramagnéticas ou diamagnéticas como elementos de liga com outros elementos como alumínio, estanho, cobre e chumbo.

No estudo realizado por BERNARDES *et al.* (2015), o processamento mecânico foi empregado no beneficiamento de metais a partir de baterias de íon-lítio, pois os metais apresentam-se encapsulados por plásticos ou cápsulas de ferro. Todas as amostras foram submetidas a moagem e peneiramento. A concentração foi realizada por duas rotas diferentes: a separação gravimétrica em uma mesa Wilfley e separação magnética em equipamento com ímãs de terras raras. O material com 40,6% de cobre foi submetido à separação magnética, que proporcionou uma concentração de 54,6% do metal, enquanto a separação gravimétrica a partir de 18% de cobre produziu um concentrado de 66,4%.

3.3.5.2 Concentração gravítica

A concentração por gravidade, densitária ou gravítica consiste em um método de separação no qual as forças gravitacional ou centrífuga são utilizadas, por meio de um fluido (água ou ar), de modo a atuar na separação de partículas que possuem variadas formas, tamanhos e densidades (SAMPAIO & TAVARES, 2005).

O bom desempenho do processo de separação gravítica depende de fatores como vazão de alimentação, faixa granulométrica, porcentagem de sólidos, diferença de densidade fluido-partícula, entre outros. Este tipo de concentração é utilizado no tratamento de partículas grossas, sendo consideradas finas as partículas que possuem

diâmetros equivalentes abaixo de 74 μm . De fato, o processo torna-se ineficiente para partículas com tamanhos abaixo de 50 μm , pois a massa da partícula não é capaz de vencer as forças viscosas do fluido, permanecendo em suspensão e comportando-se como se fosse parte do fluido (FIGUEIREDO & CHAVES, 1998).

Os principais mecanismos atuantes na concentração gravítica são descritos sucintamente a seguir (CARRISO & CHAVES, 2002; LUZ *et al.*, 2010):

- Aceleração diferencial: quando se movimenta por um curto período de tempo e distância, uma partícula está sujeita a aceleração e desaceleração até que sofra a interferência de outra partícula ou de uma superfície. A aceleração da partícula independe do seu tamanho, sendo função apenas da densidade do sólido e do fluido.
- Sedimentação retardada: quando uma partícula se move em uma polpa, o número de colisões com outras partículas aumenta. Tais colisões afetam sua trajetória, assim como o deslocamento de água por meio dos espaços entre elas. Sendo assim, as partículas de maior peso e tamanho irão se depositar primeiro, com as de menor peso e tamanho acima delas.
- Consolidação intersticial: como as partículas possuem diferentes tamanhos e/ou densidades, e que estas percorrem a mesma distância com períodos de tempo diferentes, a deposição das partículas de maior tamanho irá formar interstícios entre si, que serão ocupados por partículas menores.
- Velocidade diferencial em escoamento laminar: a trajetória de uma partícula dentro de um fluido em escoamento livre e laminar é influenciada pela inclinação da superfície em que decorre o movimento, pela espessura da camada de fluido, pelo coeficiente de atrito partícula-partícula e partícula-superfície de escoamento, pela densidade e forma das partículas, e pela rugosidade da superfície.
- Ação de forças de cisalhamento: partindo-se do princípio de que uma polpa concentrada está sujeita a esforços de cisalhamento, verifica-se que uma força de dispersão atua sobre as partículas como resultado da colisão entre elas, gerando pressões no plano de cisalhamento e no plano perpendicular a ele. O efeito

resultante desses esforços de cisalhamento sobre uma partícula é diretamente proporcional ao quadrado do diâmetro da partícula e decresce com o aumento da densidade.

3.3.5.3 Aeroclassificadores tipo zigue-zague

A classificação a ar (ou a seco) é uma técnica de separação que emprega o arraste de uma corrente de ar para segregar materiais sólidos com base em diferenças de densidade, tamanho e formato. A operação é empregada na indústria química, de extração mineral e agricultura, tendo sido adaptada para a recuperação de resíduos (PEIRCE & WITTENBERG, 1984). Como não utiliza água, pode proporcionar uma solução ecologicamente correta e econômica de classificação dimensional.

O aeroclassificador, também chamado de separador a ar ou classificador a ar, é um equipamento que possibilita a classificação de partículas de tamanho médio a partículas submicrométricas (1000 a 0,1 μm). Sua operação emprega um fluxo de gás, combinando a ação das forças gravitacional, inercial, arraste, centrífuga e de colisão (DUDA, 1977).

Existem diversos tipos de aeroclassificadores, como verificado na literatura (PERRY et al., 1999). No presente trabalho, o equipamento sob estudo é o classificador zigue-zague, inventado por STEBBINS (1930). O zigue-zague consiste em um tubo vertical com uma seção transversal retangular, paredes paralelas e uma superfície interior lisa, com dispositivos direcionais de ramal inclinado ou estágios, que geram mudanças na direção do fluxo de ar com as partículas e criam zonas de turbulência, proporcionando colisões entre partícula-partícula e partícula-parede (BIDDULPH & CONNOR, 1989).

No zigue-zague a injeção de ar é feita através da parte inferior do equipamento, ou seja, o fluxo de ar é introduzido de maneira ascendente, enquanto a alimentação é efetuada na parte superior, conferindo operação em contracorrente. As partículas são classificadas de acordo com seu comportamento de queda no canal. Existem duas correntes distintas no canal: uma de partículas transportadas para cima e outra de partículas transportadas para baixo, ao longo de cada estágio. Em cada junção de duas seções, as partículas são submetidas a uma nova classificação (SEDEN, 1987).

Para uso em laboratório, o zigue-zag pode ser construído em material acrílico (Figura 2), para permitir a visualização do processo que ocorre dentro do classificador. Devido à simplicidade da construção, constituem equipamentos baratos e de fácil manutenção. A principal vantagem do classificador zigue-zague é a gama de tamanhos de corte com a qual se pode trabalhar, de milímetros a alguns micrômetros. E segundo SHAPIRO & GALPERIN (2004), a desvantagem deste tipo de equipamento é a elevada resistência aerodinâmica, resultante dos vórtices formados nos estágios do classificador, fazendo com que se forme uma zona de forte turbulência, provocando alta queda de pressão e alto consumo de energia.

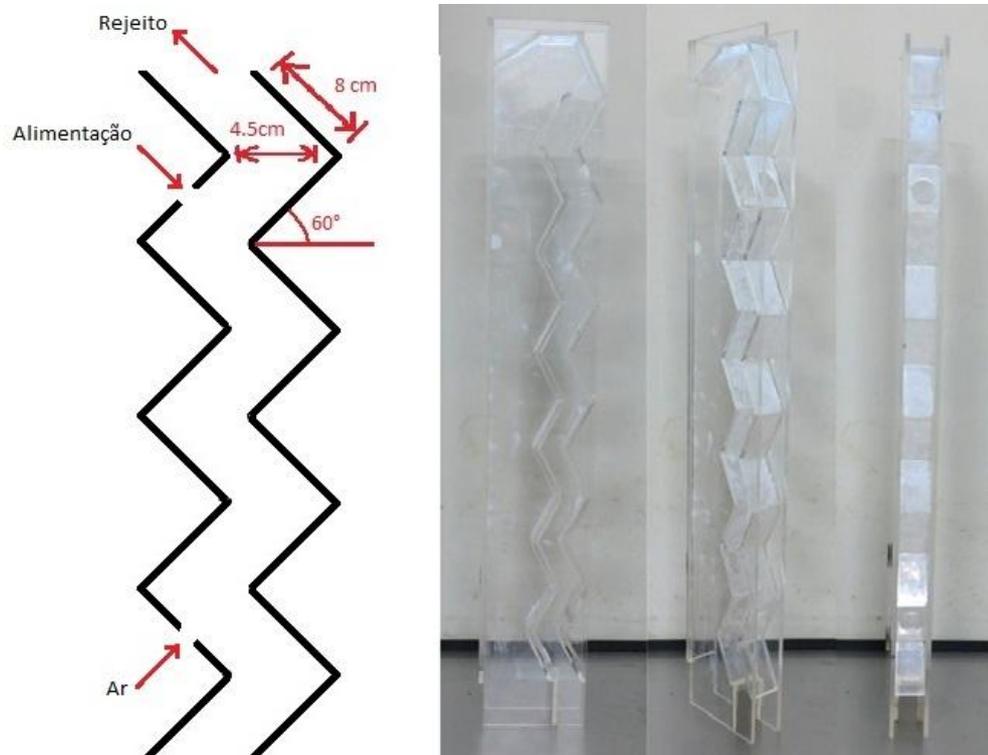


Figura 2 - Classificador zigue-zague disponível no PEMM-COPPE-UFRJ e utilizado neste trabalho.

O desempenho do classificador zigue-zague foi estudado experimentalmente por BIDDULPH & CONNOR (1989), comparando estes classificadores com os lineares. Foi observado que os classificadores zigue-zague são mais eficientes, pois o maior número de estágios proporciona que cada partícula seja submetida a uma série de classificações dentro do canal do equipamento, resultando em elevada eficiência

operacional. Sendo assim, concluiu-se que o número de estágios afeta o desempenho da separação e que melhores resultados são obtidos quando a alimentação de sólidos é realizada no meio da coluna.

SENDEN (1987) investigou o desempenho do classificador zigue-zague em baixas concentrações de partículas (100-200 partículas idênticas), utilizando pedaços quadrados de papel e esferas porosas de poliestireno como materiais de teste. O autor analisou a influência do ângulo dos estágios do classificador, nos valores de 90°, 120° e 150°. Melhores resultados foram obtidos com o ângulo de 150° (vide Tabela 2), pois alcançou-se elevada eficiência de classificação com o aumento do tempo de residência das partículas dentro do canal, ou seja, obteve-se um canal com baixa profundidade, baixa velocidade de fluidização e maior tempo de residência das partículas no canal.

Tabela 2 – Resultados obtidos com a variação do ângulo dos estágios do classificador zigue-zague.

Ângulo (α)	Profundidade do canal (cm)	Velocidade de fluidização (m/s)	Tempo de residência (s)
150°	5,1	1,42	55
120°	5,2	1,72	25,4
90°	9,8	1,46	17,3

Fonte: Adaptado de SENDEN (1987).

VESILIND & HENRIKSON (1981) estudaram a influência da taxa de alimentação sobre o desempenho da separação em um classificador zigue-zague com sete estágios, com ângulo de cada um destes de 120°. Usando plástico e alumínio em forma de quadrados como partículas, variando a taxa de alimentação (68, 136, 204, 272, 409, 545 e 818 g/min) e mantendo a velocidade constante (13,2 m/s), verificou-se que o tempo de residência das partículas diminui com o aumento da taxa de alimentação; consequentemente, a eficiência da separação também diminui, pois à medida que a concentração de partículas aumenta, algumas destas se agregam e passam a agir aerodinamicamente como uma única partícula grande, afetando o movimento das partículas no canal do classificador e o desempenho deste.

3.4 Diagrama de Schytil

A fluidização ocorre quando a vazão de fluido (gás ou líquido) ascendente através de um leito de partículas sólidas adquire velocidade suficiente para suspender o leito de partículas, proporcionando, como consequência, um maior contato superficial entre sólido e fluido (NITZ & GUARDANI, 2008). Portanto, a eficiência na utilização de um leito fluidizado depende, em primeiro lugar, do conhecimento da velocidade mínima de fluidização. Abaixo desta velocidade o leito não fluidiza (leito fixo), e muito acima dela, os sólidos são arrastados para fora do leito (transporte hidráulico ou pneumático).

O conhecimento das características físicas das partículas que participam do processo de fluidização de um leito também é fundamental. Estas incluem tamanho, distribuição de tamanho e densidade das partículas, que podem interferir diretamente na hidrodinâmica e na movimentação das partículas no leito fluidizado. Neste aspecto, a fluidização das PCI's pode representar alguma dificuldade, uma vez que suas partículas ocupam uma ampla faixa de tamanho, não apresentando regularidade de formato e constituídas por diferentes tipos de materiais de densidade variada (SILVA, 2011).

Neste contexto, o diagrama de Schytil constitui uma ferramenta importante para estabelecer as condições nas quais as partículas existirão, se estacionárias constituindo um leito fixo, em movimento moderado constituindo um leito fluidizado, ou em transporte pneumático (PACHECO, 1981). Para um determinado sistema de interesse, o diagrama fornece as condições operacionais, ou seja, diâmetro das partículas, velocidade do gás e regime de transporte, para os quais se dará, ou não, a fluidização. É possível estabelecer as fronteiras entre leito fixo/leito fluidizado, leito fluidizado/transporte pneumático, além das famílias de retas para diâmetros e velocidades superficiais do gás constantes em função dos números adimensionais de Reynolds (Re) e Froude (Fr) (CORTEZ, 2002). O número de Reynolds estabelece a relação entre as forças de inércia e as forças viscosas em um escoamento, enquanto o de Froude estabelece a relação entre as forças de inércia e as forças gravitacionais:

$$Re = \frac{dvp}{\mu} \quad (1)$$

$$Fr = \frac{v^2}{dg} \quad (2)$$

Onde:

d = diâmetro da partícula (L);

v = velocidade linear do fluido (L/t);

ρ = densidade do fluido (M/L³);

μ = viscosidade do fluido (M/Lt);

g = aceleração da gravidade (L/t).

A construção do diagrama de Schytil é feita traçando-se o logaritmo do número de Froude versus o logaritmo do número de Reynolds, para valores constantes de velocidades lineares de escoamento do fluido ou diâmetros equivalentes constantes das partículas (PACHECO, 1981). As famílias de retas de velocidade e de diâmetro constantes no diagrama de Schytil são estabelecidas através da derivada da equação que relaciona a variação do número de Froude com o número de Reynolds em condições de diâmetro e velocidades constantes, respectivamente.

Assim, a equação da reta de velocidade constante é obtida explicitando o diâmetro em função do Reynolds na equação (1) e substituindo na equação (2):

$$Fr = \frac{v^2 \rho}{Re \mu g} \quad (3)$$

e aplicando-se o logaritmo na equação (3) :

$$\log Fr = -\log Re + \log\left(\frac{v^2 \rho}{\mu g}\right) \quad (4)$$

Fazendo-se um gráfico entre log Fr versus log Re, a equação (4) representa uma reta com coeficiente angular -1 e coeficiente linear $\log\frac{v^2 \rho}{\mu g}$ para um valor constante de v.

De maneira análoga, a equação da reta com diâmetro constante é obtida explicitando a velocidade linear de escoamento em função do número de Reynolds na equação (1) e substituindo na equação (2):

$$Fr = \frac{Re^2 \mu^2}{d^2 \rho g} \quad (5)$$

e aplicando logaritmo na equação (5):

$$\log Fr = 2 \log Re + \log\left(\frac{\mu^2}{\rho g d^2}\right) \quad (6)$$

Fazendo-se um gráfico entre $\log Fr$ versus $\log Re$, a equação (6) representa uma reta com coeficiente angular igual a 2 e coeficiente linear $\log\frac{\mu^2}{\rho g d^2}$ para um valor constante de d .

A partir da equação de Ergun (SZEKELY & THEMELIS, 1971), que descreve a variação de pressão por unidade de comprimento de um leito fluidizado constituído por partículas esféricas, pode-se obter a equação de partição entre os domínios do leito fixo e do leito fluidizado:

$$Fr = \frac{\varepsilon^3}{150 \frac{(1-\varepsilon)}{Re} + 1,75} \frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g} \quad (7)$$

e a equação que descreve a partição entre os domínios do leito fluidizado e do transporte pneumático, para qualquer valor de porosidade de fluidização:

$$Fr = \frac{4}{3} \varepsilon^{4,65} \frac{(\rho_s - \rho)}{\rho_s C_d} \quad (8)$$

Onde:

ε = porosidade mínima de fluidização (-);

ρ_s = densidade do sólido (M/L);

ρ_g = densidade do fluido (M/L).

C_d = coeficiente de arraste (-), cujo valor depende do número de Reynolds, sendo mostrado na Tabela 3 para partículas esféricas.

Tabela 3 - Relação entre C_d e o número de Reynolds.

Re	0,1	1	10	100	1000
C_d	245	28	4,4	1,1	0,46

Fonte: SULLIVAN & STANCZYK (1982).

Para que o diagrama de Schytil esteja completo, deve-se sobrepor os diagramas obtidos para os vários valores de velocidade e diâmetros constantes, e as linhas que demarcam a fronteira de leito fixo/leito fluidizado, bem como leito fluidizado/transporte pneumático. Assim, pode-se construir o diagrama de Schytil, como o exemplo apresentado na Figura 3:

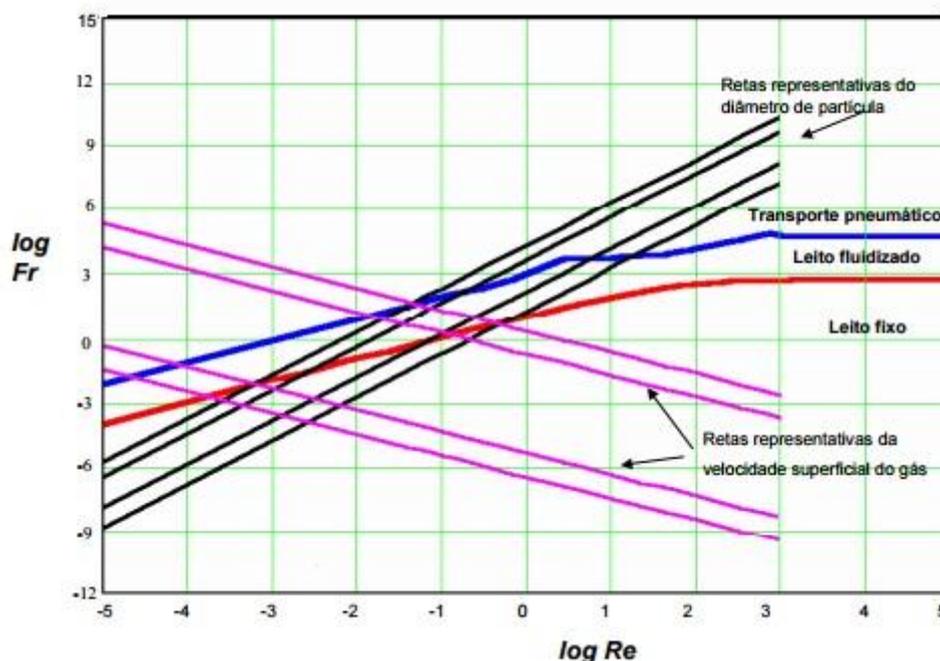


Figura 3 - Fronteiras do diagrama de Schytil (CORTEZ, 2002).

No trabalho de SAGRATZKI (1975), aplicando-se ar como agente fluidizante, verificou-se o comportamento do minério de cobre de Caraíbas durante a fluidização. Utilizando os resultados experimentais obtidos para porosidade, peso específico, granulometria, velocidades mínima e máxima de fluidização, foi elaborado o diagrama de Schytil. Constatou-se uma divergência entre os valores para velocidades experimentais e as velocidades teóricas indicadas pelo diagrama. Segundo o autor, isso ocorreu, entre outras causas, devido à não consideração das porosidades reais e fatores

de forma correspondentes às frações estudadas. Procurando certificar-se da influência desses fatores, estes foram introduzidos apenas nas determinações das duas fronteiras. Notou-se, então, um deslocamento do diagrama de Schytil, que o fez se aproximar mais das condições reais de fluidização.

Na separação entre metais e os demais constituintes das PCI's, RIBEIRO (2013) utilizou um classificador zigue-zague. Para determinar a faixa de vazão de ar adequada para os ensaios foi construído um diagrama de Schytil. Na confecção do diagrama, não foram utilizados os valores reais de densidade das partículas, devido à sua heterogeneidade, e sim valores pré-definidos (1,8 g/cm e 4 g/cm), e segundo SAGRATZKI (1975), isso pode ser a causa da diferença entre as vazões teóricas e as vazões experimentais. Os testes foram feitos com vazões variando de 8 m/h a 19 m/h. A vazão ótima de ar injetada no classificador foi de 13 m/h, sendo que os melhores resultados, para o teor de cobre, foram obtidos com a faixa de tamanho entre 0,1-0,2 mm, na qual o teor de cobre no concentrado chegou a mais de 48%, associado a uma recuperação de 88,1%.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para realizar o presente estudo, aproximadamente 8 kg de PCI's de computadores obsoletos foram coletados no campus da UFRJ. O material coletado consistiu em PCI's de diferentes modelos e anos de fabricação.

Inicialmente as placas foram parcialmente desmanteladas manualmente para a remoção de resistores, capacitores, dissipadores de calor, conectores, processadores e outros componentes de maior porte. Tal remoção foi feita por duas razões: (i) Questões econômicas, para a separação dos processadores, visto que estes contêm elementos metálicos (ouro, prata, platina) de alto valor de mercado e que podem ser recuperados separadamente através de processo hidrometalúrgico, dispensando um pré-tratamento, e também por (ii) Questões técnicas, pois estes componentes podem não se romper durante as etapas de fragmentação (trituração e moagem), congestionando o equipamento, principalmente na moagem, o que poderia afetar o rendimento do processo e resultar em perda no metal de maior valor agregado.

O foco do presente trabalho reside na concentração dos metais cobre, estanho e chumbo através de concentração gravítica, em função do teor destes metais no resíduo, seu valor agregado e potencial poluidor. Para tal, rotas distintas de processamento mecânico foram aplicadas (item 4.1) visando efetuar a separação dos diversos materiais componentes das PCI's, sendo as frações obtidas devidamente caracterizadas (item 4.2).

4.1 Processamento mecânico

Como o conteúdo metálico de interesse presente nas PCI's encontra-se normalmente revestido por materiais poliméricos e cerâmicos, o processamento mecânico da fração desmantelada objetivou a separação destes materiais de modo a se obter uma corrente concentrada em metais. Esta corrente constituirá a alimentação de uma rota de tratamento posterior baseada em operações hidrometalúrgicas, a ser desenvolvida futuramente como continuação do presente trabalho de pesquisa. Assim, o processamento mecânico das PCI's englobou as seguintes operações unitárias: trituração, moagem, peneiramento, separação magnética e separação em meio denso (via imersão em água) e a seco (utilizando-se um classificador zigue-zague operado a ar). Estas operações foram dispostas conforme 4 seqüências, constituindo as diferentes

estratégias de tratamento mostradas no fluxograma esquemático da Figura 4. Os detalhes de cada operação encontram-se mostrados a seguir. Todos os equipamentos usados são de escala laboratorial e, com exceção do separador magnético que se encontra instalado no laboratório de Eletroquímica Aplicada (PEMM/UFRJ), os demais se encontram instalados no laboratório de Tecnologia Mineral (PEMM/UFRJ).

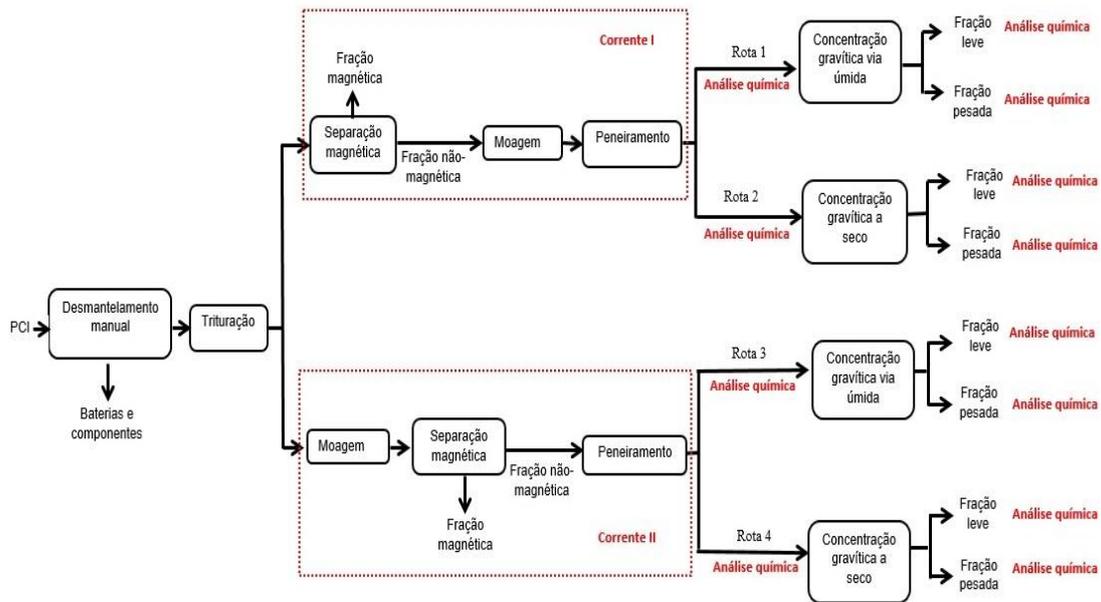


Figura 4 – Fluxograma mostrando as diferentes estratégias de processamento mecânico aplicadas às PCI's no presente estudo.

4.1.1 Trituração

Conforme mencionado anteriormente, as placas encaminhadas para a etapa de trituração sofreram desmantelamento manual prévio para a remoção de alguns componentes. Em seguida, em todas as estratégias de rotas propostas para o processamento mecânico das PCI's, o material foi alimentado inicialmente a um triturador de facas (Figura 5), marca Fragmaq, modelo FT/75, sendo esta a primeira etapa mecanizada das rotas. Este equipamento tem como principal objetivo a redução no tamanho das placas, de maneira rápida e eficiente, para que o produto obtido seja beneficiado nas etapas posteriores.

O triturador de facas é composto por um funil de alimentação, dois eixos de rotação compostos por lâminas de corte, um motor WEG com potência instalada de 7,5

CV e um painel de comando. O conjunto funil e eixos de facas formam a câmara de trituração. As PCI's foram alimentadas pelo funil de alimentação e fragmentadas mediante ação das lâminas de corte. Após a trituração, as PCI's apresentaram tamanhos abaixo de 10 cm de comprimento e 5 cm de largura.



Figura 5 – Triturador de facas.

4.1.2 Moagem

A moagem propicia a redução significativa no tamanho do material, gerando partículas relativamente uniformizadas com relação ao tamanho e proporcionando uma maior liberação dos metais contidos nas placas. Este estágio foi executado em um moinho de facas tipo Wyllie com 2 CV de potência (Figura 6 a), marca CIENLAB, modelo CE-430, com uma abertura da saída de aproximadamente 2,5 mm (Figura 6 b). Como as PCI's são compostas por camadas, sua fragmentação é dificultada, pois o material pode não romper e sim flexionar. O moinho de facas consegue cominuir de forma eficiente as partículas a tamanhos nos quais é possível observar visualmente a liberação dos metais constituintes destas placas.



Figura 6 – Moinho de facas (a) e abertura da saída do moinho (b).

Após cada moagem, o produto obtido foi dividido em duas frações utilizando-se um quarteador tipo Jones, para realizar as etapas seguintes.

4.1.3 Separação magnética

Esta etapa foi realizada utilizando-se um separador magnético a seco com magneto de terras-raras que propicia campo magnético de 3000 gauss, mostrado na Figura 7, projetado e manufaturado no laboratório do PEMM da COPPE/UFRJ.



Figura 7 – Separador magnético.

O equipamento foi operado com uma rotação de 17 rpm e alimentação de 80 g/minuto. O material foi alimentado manualmente ao longo da esteira do equipamento, de maneira uniforme, e a movimentação da esteira feita mediante o acionamento de uma

manivela. A fração magnética ficou retida na região de maior intensidade do campo magnético criado pelo separador, enquanto a fração não magnética foi coletada na parte inferior do equipamento com uma bandeja. Após isto, o material magnético que continuou na esteira foi liberado e também coletado. Uma amostra da fração magnética foi recolhida e enviada para análise química. O material não magnético foi encaminhado para a etapa seguinte.

4.1.4 Classificação granulométrica

Nesta etapa, as amostras de material não magnético foram classificadas granulometricamente utilizando-se um conjunto de peneiras. Foram usadas sete peneiras com as seguintes aberturas: 2; 1,2; 0,85; 0,71; 0,5; 0,3; 0,125 mm e fundo.

Aproximadamente 2 kg do material foi disposto na peneira superior e peneirado por quinze minutos com auxílio de um agitador mecânico com batida intermitente (Rotap). Este procedimento foi repetido por mais três vezes. As frações recolhidas em cada peneira foram pesadas em balança semi-analítica (marca Shimadzu, modelo BL-3200H), divididas ao meio com relação ao peso e encaminhadas para as etapas de classificação (úmido e seco), conforme as rotas de processamento das PCI's mostradas na Figura 4. Amostras recolhidas em cada peneira foram encaminhadas para análise química.

4.1.5 Concentração gravítica (imersão em água)

A concentração gravítica (rotas 1 e 3) foi realizada utilizando-se água destilada como meio fluido, escolhido em função de maior acessibilidade e baixo custo. Utilizou-se um béquer com capacidade de 1000 mL, no qual foi adicionado 200 mL de água (em pH 5 e temperatura de 25°C, a água possui as seguintes propriedades: densidade = 1000 g/cm³ e viscosidade = 0,0089 g/cm.s). Adicionou-se então 15 g da amostra no recipiente. Após repouso por um período de 20 minutos, verificou-se que a separação estava completa, pois na superfície flutuava a fração leve, enquanto a fração pesada encontrava-se depositada no fundo do béquer. A fração leve foi recolhida com o auxílio de uma malha de aço com abertura de 0,1 mm. O líquido foi drenado em seguida e a fração pesada recuperada. Ambas as frações foram encaminhadas para estufa a 50°C para secagem por 2 horas e deixadas resfriar em dessecador. Depois, realizou-se a pesagem de cada fração, sendo retiradas amostras para a realização de análise química.

4.1.6 Classificação a seco (coluna em zigue-zague)

A classificação a seco (rotas 2 e 4) utilizando-se ar como fluido compressível pode implicar em menor custo e rapidez de operação pois dispensa o uso de reagentes químicos, além de não requerer secagem posterior do material para evitar eventual oxidação. Tem-se, ainda, o fato de não gerar efluentes líquidos, apesar de necessitar o uso de filtros para purificação da corrente de ar de saída. Para realizar o ensaio de separação a seco, utilizou-se um classificador zigue-zague (Figura 8), projetado e manufaturado no Laboratório de Eletroquímica Aplicada (PEMM/UFRJ).

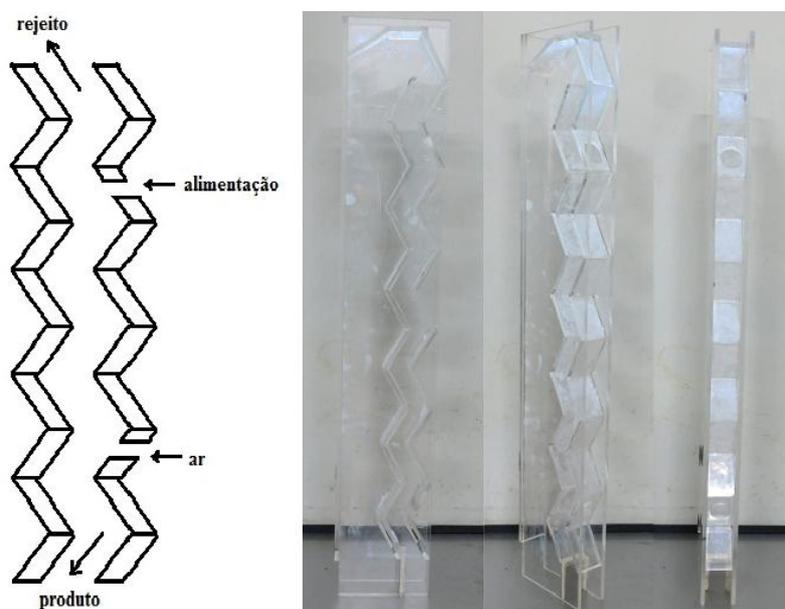


Figura 8 – Classificador zigue-zague.

Este dispositivo é constituído por uma coluna vertical, com uma entrada para alimentação na parte superior e outra para injeção de ar na parte inferior, criando um fluxo ascendente que promove a separação desejada. Sua configuração em zigue-zague faz com que a influência do fator de forma das partículas na sua classificação seja minimizada. Após determinar a densidade das partículas pelo método de picnômetro, foram elaborados os diagramas de Shcytil para cada faixa de tamanho de partículas previamente determinada. Este diagrama fornece as condições operacionais para o classificador zigue-zague, mais especificamente a velocidade (vazão) de escoamento de ar. Utilizando as velocidades mínimas fornecidas pelo diagrama, calibrou-se o soprador de ar (marca B-air Blowers, modelo KP-1200), cuja vazão máxima é de 18,5 m³/h, para cada faixa granulométrica. Após iniciar o fluxo de ar no classificador, fez-se a

alimentação da amostra, cerca de 10 g por batelada. Foram realizadas 4 bateladas. As partículas leves foram imediatamente arrastadas pelo fluxo, já as partículas pesadas foram direcionadas por gravidade para a caixa coletora localizada na parte inferior da coluna. Foram coletadas amostras de 1 g de cada produto para análise química.

4.2 Caracterização das amostras

A caracterização das amostras foi feita com o intuito de identificar e quantificar o teor metálico presente nas diversas frações granulométricas do material processado oriundo das PCI's. Com exceção da etapa de trituração, amostras foram recolhidas ao final de cada etapa. Foram empregados os seguintes métodos: microscopia eletrônica de varredura e espectrofotometria de absorção atômica, após digestão das amostras em água régia. E, para se determinar a densidade do material processado foi empregado o método picnométrico.

4.2.1 Microscópio eletrônico de varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV), modelo JEOL JSM-6460 LV, com espectroscopia de energia dispersiva (EDS) fornece uma análise semi-quantitativa das amostras. O princípio de funcionamento do MEV é baseado na emissão de feixes de elétrons por um filamento de tungstênio.

Estes equipamentos fornecem informações quanto a morfologia e a composição elementar da superfície da amostra. O EDS permite identificar as proporções relativas de elementos específicos presentes na amostra. No equipamento instalado no Laboratório Multi-usuário de Microscopia Eletrônica e Microanálise do PEMM/UFRJ, as seguintes condições analíticas foram utilizadas para as análises das amostras de PCI's: análise com elétrons retroespalhados, feixe de elétrons com resolução nominal de 10 nm, regulável para tensões de 15 a 20 kV, alto vácuo e tempo de contagem do EDS de 120 s por análise.

4.2.2 Espectrofotometria de absorção atômica (AA)

Consiste em uma técnica espectroanalítica para determinação quantitativa de metais e semimetais baseada na absorção de radiação eletromagnética por átomos livres no estado gasoso. Como átomos em seu estado mais estável são capazes de absorver energia luminosa, a aplicação de fontes de luz conjugadas com sistemas eficientes de

seleção de comprimentos de onda permite a determinação dos elementos. O comprimento de onda absorvido pelo átomo é específico de cada elemento, e a quantidade de radiação absorvida proporcional à concentração do elemento de interesse na solução conforme a lei de Lambert-Beer.

A análise química foi executada utilizando-se um espectrofotômetro de absorção atômica de chama (marca Shimadzu, modelo AA 6800) localizado no Laboratório de Análises Químicas e Processamentos Cerâmicos do PEMM/UFRJ. As amostras foram analisadas em solução aquosa, obtidas mediante digestão das mesmas em água régia (proporção em volume de 3 HCl : 1 HNO₃ 65%). A chama produzida no equipamento utilizou ar como oxidante e acetileno como combustível para a análise dos elementos chumbo, cobre e estanho.

Para proceder a digestão das amostras sólidas em água régia, o seguinte procedimento foi adotado. Inicialmente, uma amostra de 1 g de cada fração granulométrica obtida nas etapas do processamento mecânico, indicadas no fluxograma da Figura 4, foi adicionada à 20 mL de solução de água régia. A digestão da amostra em água régia foi realizada em uma capela, sobre uma placa aquecedora (marca Corning, modelo PC 420-D) à temperatura de 85°C durante 2 h. Através de filtração com papel filtro quantitativo (JP40 faixa branca, porosidade 25 µm), separou-se a parte líquida da parte sólida. O papel de filtro foi lavado com água destilada e a fração líquida recolhida (contendo os metais solúveis em água régia), diluída em balão volumétrico de 100 mL e enviada para análise química. Como o papel de filtro foi previamente pesado, após ser encaminhado para estufa durante 5 h à temperatura de 100°C, foi possível determinar a massa de material sólido nele retido, que corresponde, predominantemente, aos materiais poliméricos e cerâmicos.

Com os resultados obtidos na análise química realizada após a etapa de peneiramento, as frações que apresentaram maior concentração em termos percentuais dos metais de interesse deste trabalho (Cu, Pb e Sn) foram selecionadas para as etapas de classificação a ar e separação gravimétrica.

4.2.3 Método picnométrico

Com o objetivo de medir a densidade relativa de cada faixa granulométrica, aplicou-se o método picnométrico, baseado no procedimento descrito por SILVA

(2007). É o método mais prático para determinar a densidade de uma substância. O picnômetro consiste de um frasco de vidro com fundo chato, equipado com uma rolha também de vidro, através da qual passa um canal capilar, que mantém o volume do frasco invariável. Para realizar a concentração de substâncias por meio de processos gravíticos, uma das propriedades usadas é a densidade, associada a outras propriedades como forma e tamanho de partículas (SAMPAIO & SILVA, 2007).

Utilizando uma amostra representativa do material, calculou-se a densidade com base na Equação (9):

$$d_s = \frac{M_2 - M_1}{(M_4 + M_2) - (M_1 + M_3)} \quad (9)$$

onde:

d_s = densidade dos sólidos (M/L);

M_1 = massa do picnômetro (M);

M_2 = massa do picnômetro + água (M);

M_3 = massa do picnômetro + amostra (M);

M_4 = massa do picnômetro + amostra + água (M).

Pesou-se o picnômetro vazio em uma balança semi-analítica, previamente limpo e seco, obtendo-se o valor de M_1 . Posteriormente, o picnômetro foi preenchido com água; ao colocar a tampa, a água transbordou através do capilar, enxugou-se a superfície externa do mesmo, e em seguida, pesou-se o picnômetro com água, que corresponde ao valor de M_2 . Após drenagem da água e secagem do balão, adicionou-se a amostra de PCI's no picnômetro e, em seguida, pesou-se todo o conjunto, obtendo-se o valor de M_3 . Adicionou-se água ao picnômetro com a amostra em seu interior. Após verificar se não havia formação de bolhas, pesou-se novamente o picnômetro, peso este equivalente a medida de M_4 . Aplicando estes valores na Equação 9, determinou-se a densidade relativa das amostras de PCI's de cada faixa granulométrica.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Desmantelamento manual, separação magnética, moagem e peneiramento

Aproximadamente 8kg de PCI's foram utilizadas neste estudo. Após o desmantelamento manual, 6.922 g de PCI's foram encaminhadas para a etapa seguinte do processamento mecânico. As placas desmanteladas manualmente foram processadas no triturador de facas, sem terem sido observadas perdas detectáveis de massa. Em seguida, como indicado na Figura 4, duas amostras, denominadas corrente I e corrente II, foram coletadas e passaram pela seguinte sequência de tratamento:

- Corrente I: separação magnética → moagem → peneiramento
- Corrente II: moagem → separação magnética → peneiramento

O balanço de massa total das correntes I e II referente às etapas de separação magnética, moagem e peneiramento é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Balanço de massa total das etapas de separação magnética, moagem e peneiramento das correntes I e II.

	Entrada (g)	Saída (g)	Diferença	
			g	%
Corrente I				
Separação magnética	3331	2981	350	10,5
Moagem	2981	2967	14	0,5
Peneiramento	2967	2967	0	0,0
Corrente II				
Moagem	3591	3571	20	0,6
Separação magnética	3571	3188	383	10,7
Peneiramento	3188	3188	0	0,0

Com base nos resultados obtidos, não se observaram diferenças relevantes nas variações percentuais em massa total para as diferentes estratégias de tratamento, no que se refere à sequência das operações unitárias separação magnética e moagem. A diferença em massa verificada na etapa de separação magnética corresponde à fração metálica recolhida, em torno de $10,6 \pm 0,1\%$ da carga alimentada. A perda na etapa de moagem, realizada em um moinho de facas, foi pequena, de $0,55 \pm 0,05\%$. Como as PCI's, em sua maioria, são produzidas por fixação, soldagem e empacotamento, a

moagem ocorreu de maneira relativamente fácil, pois os materiais que interferem nesta operação foram removidos no desmantelamento manual. Os elementos metálicos presentes nas PCI's encontram-se frequentemente envolvidos por materiais cerâmicos e/ou poliméricos (SUM, 1991), sendo assim, a moagem resultou na liberação dos materiais cerâmicos, poliméricos e metálicos, como é examinado a seguir. Não houve perdas quantificáveis na etapa de peneiramento.

- Corrente I: separação magnética → moagem

A operação de separação magnética coletou fragmentos de variados tamanhos (Figura 9-a). Uma parcela destes fragmentos estava vinculada à fração não-magnética, o que resultou em uma fração magnética contendo traços de metais condutores, material cerâmico e polimérico. Através do balanço de massa total mostrado na Tabela 4, observa-se que a massa de fração magnética recolhida pelo separador foi de 350 g.

Somente a fração não-magnética foi encaminhada para a moagem, a fim de liberar os metais de interesse (cobre, estanho e chumbo). No entanto, a fração não-magnética também contém material magnético, como ferro e níquel, provavelmente porque esses metais encontram-se em partículas paramagnéticas ou diamagnéticas como elementos de liga com outros metais como alumínio, estanho, cobre e chumbo (LEE, 2009), que foram liberados durante a operação de moagem. Todo o material moído possui granulometria menor ou igual a abertura da peneira do moinho (2,5 mm). Este produto foi encaminhado para o peneiramento.

- Corrente II: moagem → separação magnética

O procedimento de moagem foi o mesmo seguido na rota anterior. As PCI's moídas foram então submetidas a separação magnética. A fração magnética (383 g) recolhida durante a separação magnética é apresentada na Figura 9-b, na qual se observa que a maior parte do material possui um aspecto fino. Procedeu-se a análise química por absorção atômica de uma amostra da fração magnética, cujo resultado é mostrado na Figura 10. Observa-se uma perda de 22% dos metais de interesse (cobre, estanho e chumbo), comprovando a existência de partículas paramagnéticas e/ou diamagnéticas no material magnético. Outros metais, como ferro e níquel, compõem os 78% da fração magnética solúvel em água régia.

Em termos comparativos, a separação magnética realizada após a moagem (corrente II) produziu resultados melhores do que sequência inversa destas operações (corrente I). Vale comentar que a remoção do material magnético no processamento mecânico é importante para reduzir a quantidade de elementos, como ferro e níquel, e concentrar os metais cobre, estanho e chumbo na fração não-magnética. Isso facilita a separação posterior dos metais de interesse pois, por exemplo, caso uma rota hidrometalúrgica seja aplicada, ferro e níquel constituirão impurezas a serem removidas do licor de lixiviação ora produzido.



Figura 9 – Aspecto do produto das PCI's após o separador magnético na corrente I (a) e na corrente II (b).

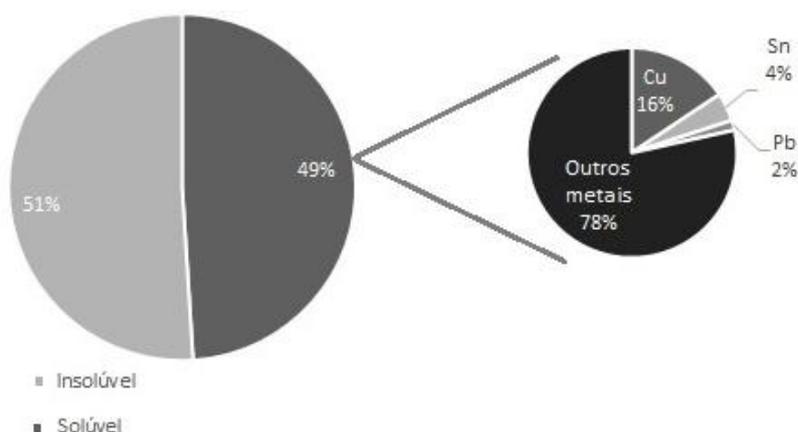


Figura 10 – Percentagem de material solúvel e insolúvel em água régia presente na fração magnética da corrente II e distribuição das espécies metálicas cobre, estanho e chumbo.

- Peneiramento

A distribuição granulométrica em quantidade percentual de material por peneira é apresentada na Figura 11. De uma maneira geral, com base nos valores mostrados nestas figuras, não foram verificadas alterações relevantes na distribuição da massa total das correntes I e II após peneiramento, nas condições operacionais estudadas.

Observa-se na Figura 11 que cerca de 66% do peso das duas correntes concentra-se nas faixas granulométricas acima de 0,85 mm, e que pelo menos 10% da amostra é constituída de material fino (menor que 125 μm). Esses resultados revelam que após a cominuição o material se acumulou nas frações de maior tamanho ($\geq 0,85$ mm), mantendo a tendência apresentada em estudos anteriores (MORAES, 2010; VEIT, 2001).

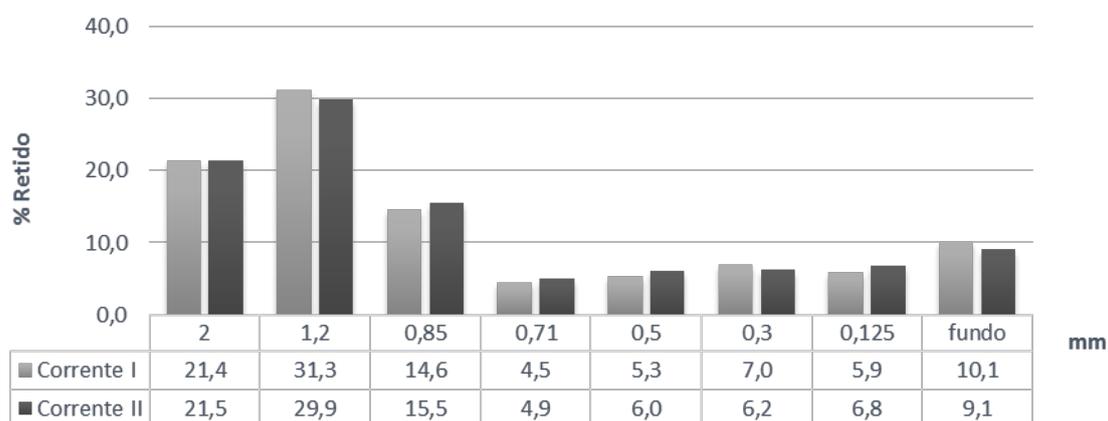


Figura 11 – Distribuição granulométrica percentual da massa total das correntes I e II após a moagem.

Amostras de 1,0 g de todas as frações granulométricas foram coletadas e analisadas com o intuito de se verificar a distribuição dos metais cobre, estanho e chumbo por faixa de tamanho, de modo a identificar aquelas que se mostram mais susceptíveis ao tratamento. As amostras foram digeridas em água régia, sendo quantificadas as porções solúveis e insolúveis que, como mostrado na Figura 12, variou conforme a faixa granulométrica. Observa-se, ainda, que a proporção percentual do material solúvel e insolúvel é relativamente semelhante entre as correntes I e II, para as mesmas faixas granulométricas. Considera-se que a fração solúvel é composta

predominantemente por metais (incluindo cobre, estanho e chumbo, dentre outros), e na fração insolúvel predominam materiais cerâmicos e poliméricos.

Do ponto de vista percentual, verifica-se que o teor de metais é maior nas faixas intermediárias ($0,71 \leq d \leq 2$ mm). O teor de material cerâmico e polimérico é visivelmente maior nas faixas extremas, tanto na granulometria mais fina ($d \leq 0,3$ mm) quanto na mais grossa ($d \geq 2$ mm). Isso ocorre porque fragmentar materiais cerâmicos e poliméricos é mais fácil do que fragmentar materiais metálicos, além de se verificar certa irregularidade no tamanho do material obtido. Há, ainda, uma faixa granulométrica intermediária em que se observou um certo equilíbrio entre os teores de metais e de materiais cerâmico e polímeros ($0,3 \leq d \leq 0,71$ mm). Logo, em termos percentuais, os metais concentraram-se predominantemente nas faixas entre 0,3-2 mm, embora encontrem-se distribuídos por todas as faixas de tamanho.

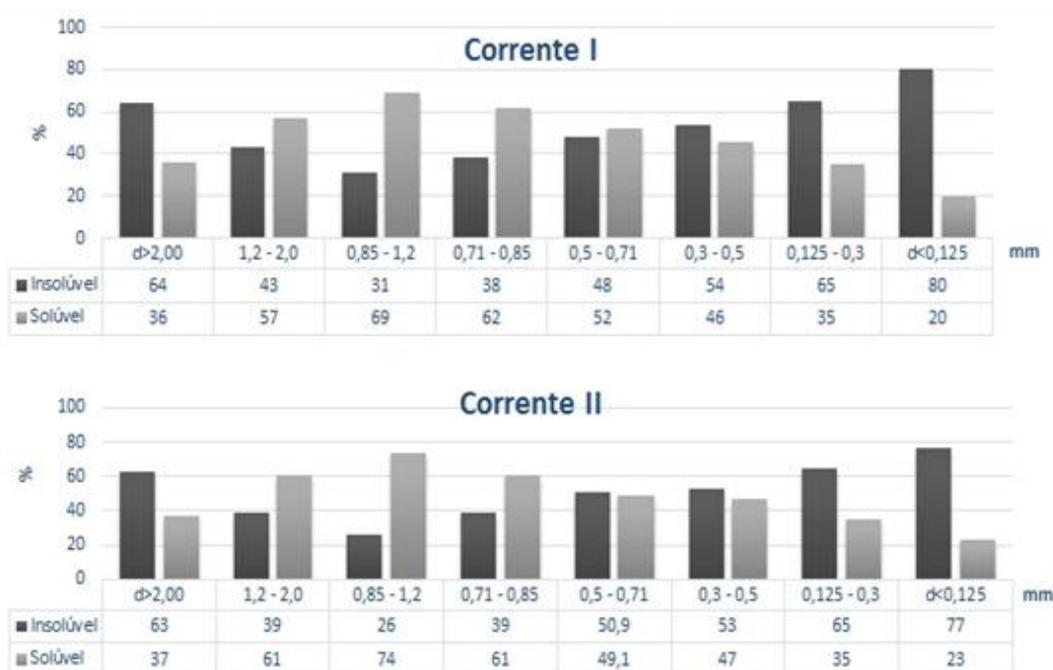


Figura 12 – Porcentagem do material solúvel e insolúvel em água régia presente nas correntes I e II.

Os teores percentuais dos metais de interesse (cobre, estanho e chumbo) nas correntes I e II em relação à fração de material solúvel em água régia são apresentados na Figura 13.

Observa-se, com base na Figura 13, que os metais de interesse se encontram relativamente mais concentrados nas faixas granulométricas intermediárias, e que houve

maior concentração de cobre e estanho na corrente II que na corrente I. Logo, a sequência moagem seguida por separação magnética se mostrou mais adequada à concentração dos metais; a sequência das etapas, porém, praticamente não afetou a concentração de chumbo.

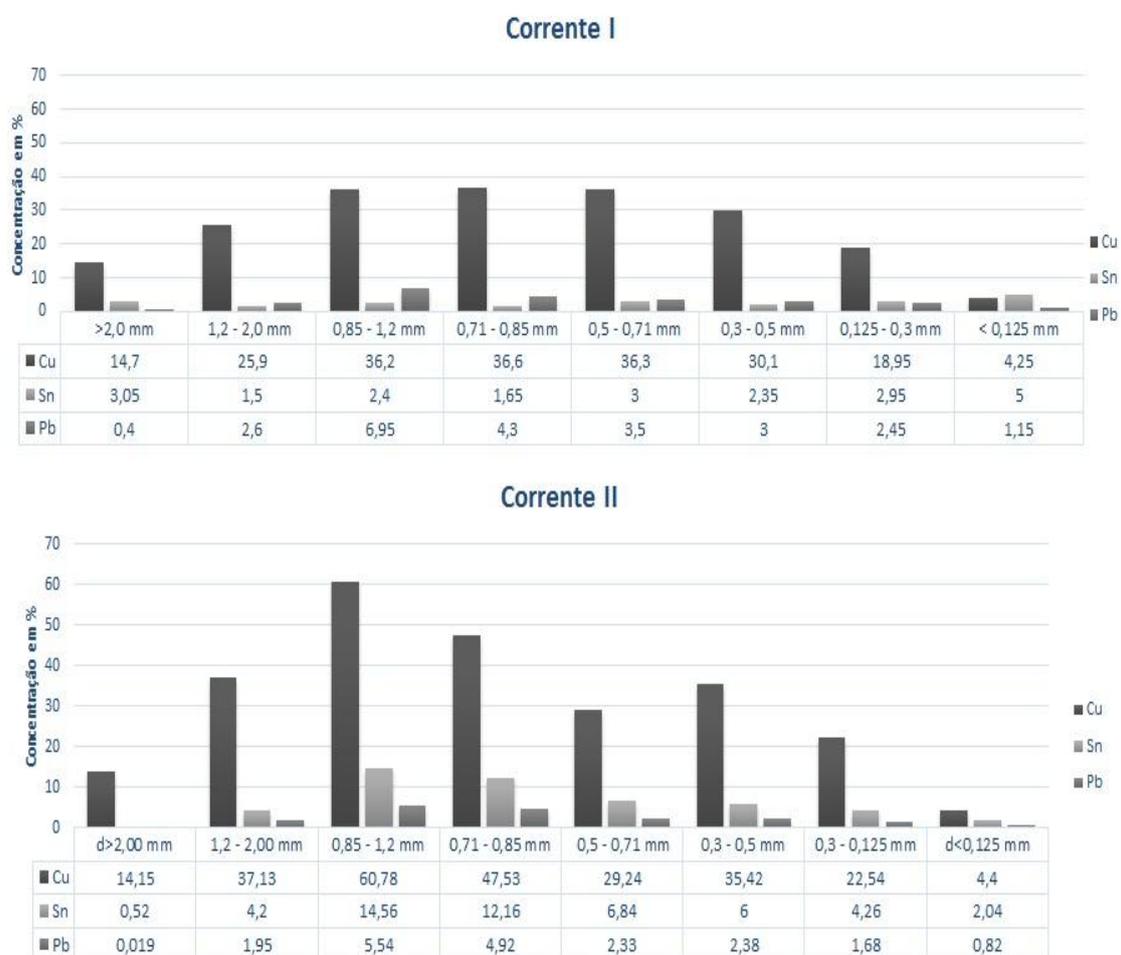


Figura 13 – Distribuição das espécies metálicas cobre, estanho e chumbo na fração solúvel por faixa granulométrica das correntes I e II.

Para o cobre, teores superiores a 25% foram obtidos na faixa granulométrica compreendida entre 0,3-2 mm, atingindo 60,8% na faixa 0,85-1,2 mm na corrente II. Para estanho, a corrente I não apresentou concentração nítida em uma faixa granulométrica específica, com flutuações em torno de $2,4 \pm 0,5\%$ em todas as faixas, exceto na granulometria mais fina $\leq 0,125$ mm, onde se atingiu 5%. Ao contrário, na corrente II, o teor de estanho foi de $10 \pm 3\%$ na faixa granulométrica entre 0,3-1,2 mm, alcançando 14,6% em 0,85-1,2 mm. Para chumbo, em ambas as correntes, teores acima

de 4% foram obtidos somente na faixa entre 0,71-1,2 mm, com teor inferior a 1,2% nas frações mais fina (< 0,125 mm) e grossa (> 2 mm).

As Tabelas 5 e 6 apresentam a massa total (solúvel e insolúvel) referente à massa da amostra total, o conteúdo metálico percentual para cada faixa granulométrica nas correntes I e II, respectivamente, considerando a fração insolúvel constituída predominantemente por materiais poliméricos e cerâmicos.

Tabela 5 – Distribuição das frações insolúveis (polímeros e cerâmicos) e solúveis (metais cobre, estanho, chumbo e outros) na corrente I.

Faixa (mm)	Massa total (%)	Material insolúvel %	Material solúvel			
			Conteúdo metálico (%)			
			Cu	Sn	Pb	Outros
d>2	21,4	13,7	1,1	0,24	0,03	6,3
1,2 - 2	31,3	13,4	4,6	0,27	0,46	12,5
0,85 - 1,2	14,6	4,5	3,6	0,24	0,70	5,5
0,71 - 0,85	4,5	1,7	1,0	0,05	0,12	1,6
0,5 - 0,71	5,3	2,5	1,0	0,08	0,10	1,6
0,3 - 0,5	7,0	3,8	1,0	0,08	0,10	2,1
0,3 - 0,125	5,9	3,8	0,4	0,06	0,05	1,6
d<0,125	10,1	8,1	0,1	0,10	0,02	1,8
Total	100,0	51,6	12,8	1,11	1,59	32,9

Observa-se que aproximadamente 50% da massa total de material a ser tratada, independentemente da corrente considerada, consiste de material polimérico e cerâmico. Portanto, sua remoção pode resultar em redução considerável no volume total de material a ser tratado para a recuperação dos metais de interesse.

Com relação à fração metálica, observa-se uma maior concentração total de cobre (18,8%) e estanho (3,38%), apesar do menor teor de chumbo (1,32%), na corrente II, o que favorece a sequência moagem seguida de separação magnética no beneficiamento mais eficaz do resíduo de PCI's.

Tabela 6 – Distribuição das frações insolúveis (polímeros e cerâmicos) e solúveis (metais cobre, estanho, chumbo e outros) na corrente II.

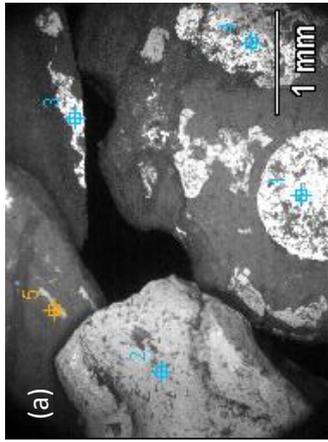
Faixa (mm)	Massa total (%)	Material insolúvel %	Material solúvel			
			Conteúdo metálico (%)			
			Cu	Sn	Pb	Outros
d>2	21,5	13,5	1,1	0,04	0,00	6,8
1,2 - 2	29,9	11,7	6,8	0,77	0,35	10,4
0,85 - 1,2	15,5	4,0	7,0	1,68	0,63	2,2
0,71 - 0,85	4,9	1,9	1,4	0,37	0,15	1,1
0,5 - 0,71	6,0	3,1	0,9	0,20	0,07	1,8
0,3 - 0,5	6,2	3,3	1,0	0,18	0,07	1,6
0,3 - 0,125	6,8	4,4	0,5	0,10	0,04	1,7
d<0,125	9,1	7,0	0,1	0,04	0,02	1,9
Total	100,0	49,0	18,8	3,38	1,32	27,5

Como não foi realizada análise elementar nas frações não-magnéticas na saída do separador magnético, e dada a heterogeneidade da amostra obtida na corrente I (Figura 9-a), acredita-se que tenha havido maior perda de cobre nesta operação quando a separação magnética precedeu a moagem (corrente I). Pode-se observar maior conteúdo percentual de outros metais na corrente I (32,9%) que na corrente II (27,5%), o que reforça esta hipótese.

Embora se observe, em geral, maior concentração percentual de cobre, estanho e chumbo nas frações compreendidas entre 0,3 e 1,2 mm, tem-se que 42-45% de cobre, 24-45% de estanho e 26-31% de chumbo, encontram-se distribuídas na faixa com granulometria maior que 0,85 mm, nas duas correntes. Porém, em função de limitações técnicas descritas nas operações seguintes de concentração (vazão do soprador no classificador zigue-zague, mencionada no item 4.1.6), o presente estudo contemplou a concentração dos metais de interesse nas faixas 0,85-1,2 mm; 0,71-0,85 mm; 0,5-0,71

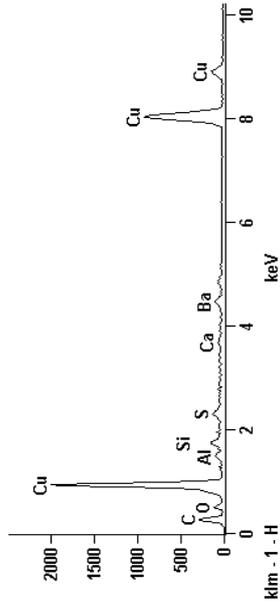
mm e 0,3-0,5 mm (marcados em cinza nas Tabelas 5 e 6) para sua continuação. Nestas faixas, encontram-se acumulados, em massa, 52-55% do cobre, 40-72% do estanho e 64-69% do chumbo, nas duas correntes.

As imagens obtidas por MEV (Figura 14) mostram a variação no formato das partículas de PCI's produzidas após moagem. Este fator físico é fundamental no processo de concentração gravítica a seco, pois interfere diretamente na hidrodinâmica e movimentação das partículas durante a fluidização. Segundo SILVA (2011), a fluidização das partículas de PCI's apresenta dificuldades, visto que suas partículas se distribuem por uma ampla faixa de tamanho, não apresentam regularidade de formato e são constituídas por diferentes tipos de materiais de densidade variada, fato este comprovado pelos resultados obtidos por EDS. Observa-se que cobre é o elemento principal em praticamente todas as frações granulométricas. Foram identificadas a presença de outros metais, como chumbo, estanho, níquel, zinco, silício e alumínio na constituição das placas, distribuídos nas frações estudadas.



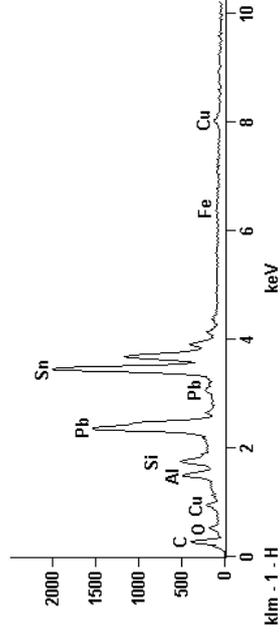
Full scale counts: 2000

8 30x_pt5



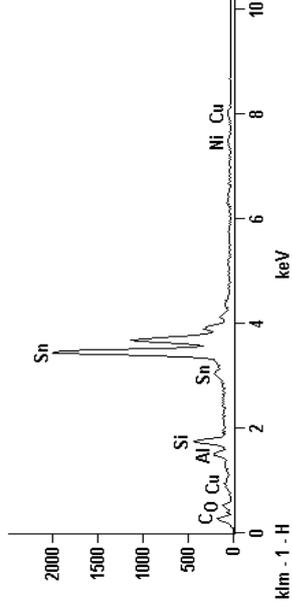
Full scale counts: 2000

8 30x_pt1



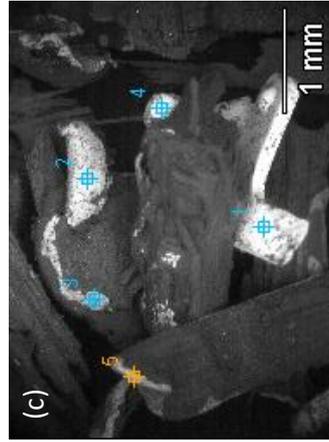
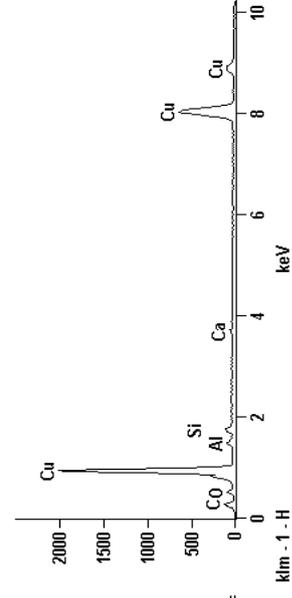
Full scale counts: 2000

7 30x_pt1



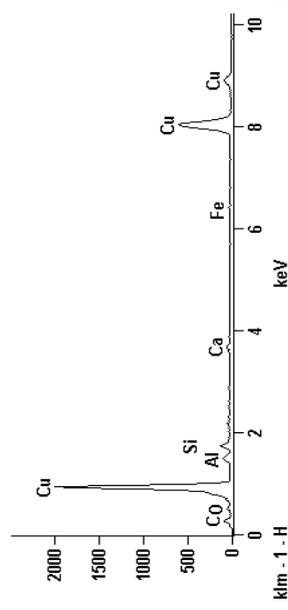
Full scale counts: 2001

7 30x_pt3



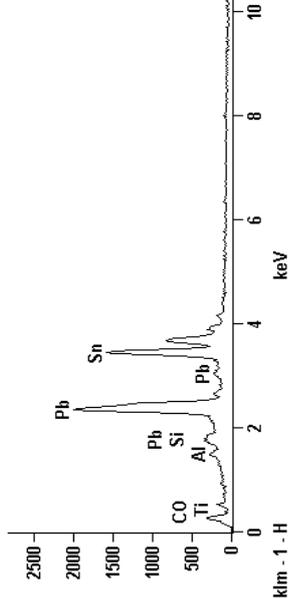
Full scale counts: 2000

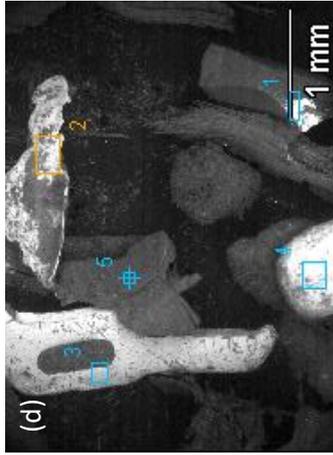
6 30x_pt3



Full scale counts: 2000

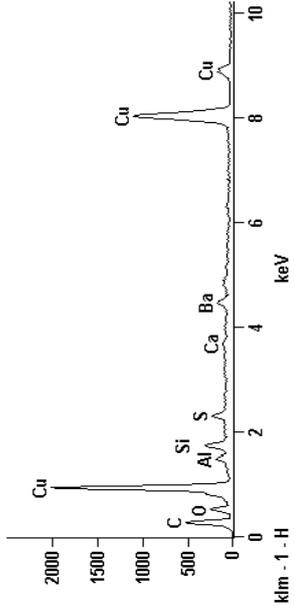
6 30x_pt4





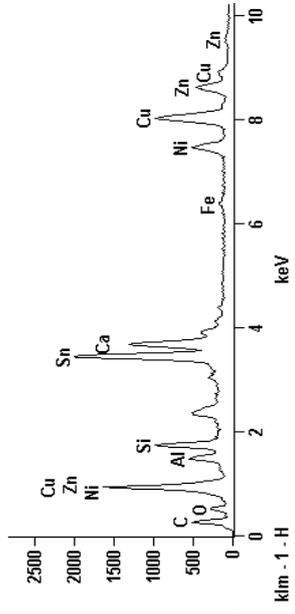
Full scale counts: 2001

5.30x_pt2



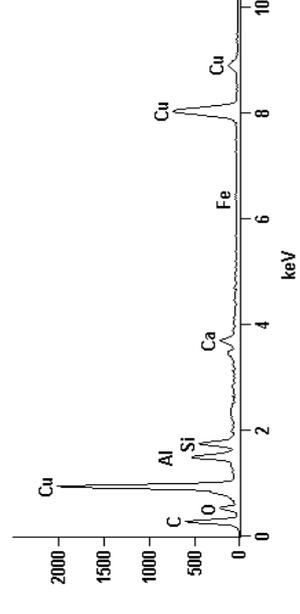
Full scale counts: 2000

5.30x_pt4



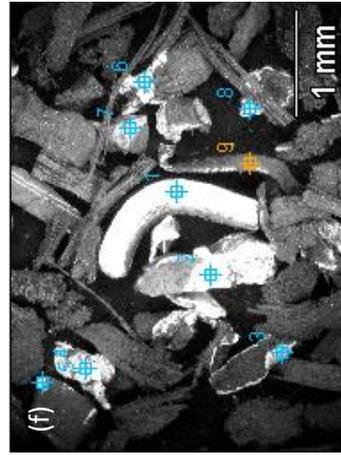
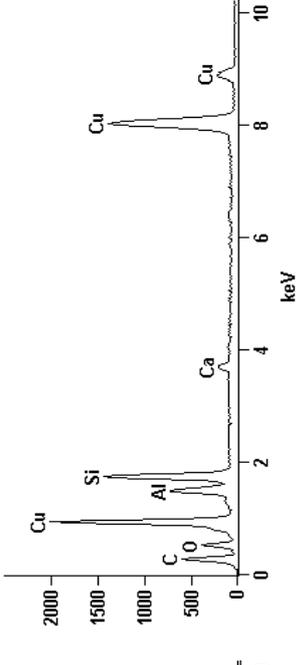
Full scale counts: 2001

4.30x_pt1



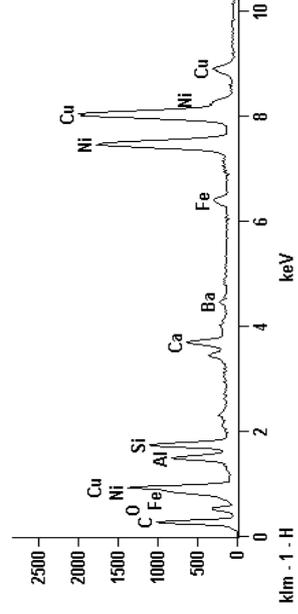
Full scale counts: 2002

4.30x_pt4



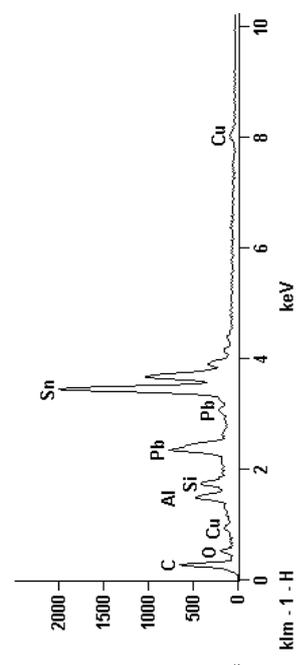
Full scale counts: 2000

3.30x_pt1



Full scale counts: 2000

3.30x_pt2



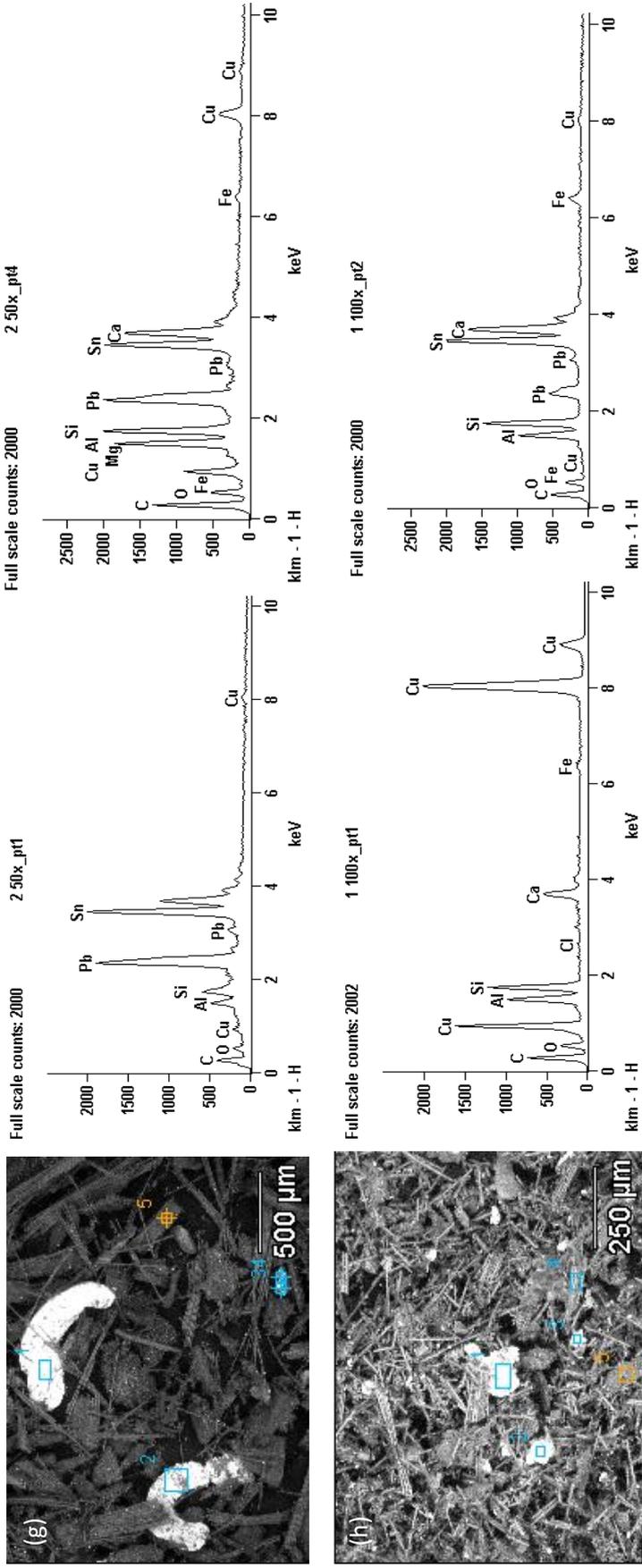


Figura 14 – Imagens analisadas por MEV-EDS nas frações granulométricas estudadas: (a) > 2,00 mm; (b) 1,2 – 2,00 mm; (c) 0,85 – 1,2 mm; (d) 0,71 – 0,85 mm; (e) 0,5 – 0,71 mm; (f) 0,3 – 0,5 mm; (g) 0,125 – 0,3 mm; e (h) < 0,125 mm.

5.2 Concentração gravítica

Inicialmente mediu-se a densidade relativa (ρ) das faixas granulométricas trabalhadas utilizando-se o método picnométrico. Os resultados encontram-se reunidos na Tabela 7.

Tabela 7 – Densidade relativa por faixa granulométrica, segundo o método picnométrico.

Faixa granulométrica (mm)	Densidade relativa ρ (g/cm ³)		
	Corrente I	Corrente II	Valor médio (g/cm ³)
0,85 - 1,2	2,5	3,6	3,1 ± 0,5
0,71 - 0,85	2,2	3,2	2,7 ± 0,5
0,5 - 0,71	2,0	2,4	2,2 ± 0,2
0,3 - 0,5	1,6	2,3	2,0 ± 0,3

Verifica-se que a densidade relativa das amostras variou tanto com relação à faixa granulométrica quanto com relação à sequência das operações de moagem e separação magnética no beneficiamento das PCI's. Tal comportamento está relacionado ao balanço percentual entre as composições metálica (de maior densidade) e de material plástico e cerâmico (de menor densidade). De fato, observa-se nas Tabelas 5 e 6 que os teores percentuais de material insolúvel (plástico e cerâmico) aumentaram com a diminuição no tamanho da fração granulométrica das duas correntes, o que pode ter provocado a redução na densidade das frações de menor tamanho. Já com relação às correntes I e II, a quantidade de material insolúvel nas frações entre 0,3 e 1,2 mm foi de 12,5% e 12,3%, respectivamente, o que também corrobora a hipótese levantada para a explicação dos resultados. Supõe-se, também, que possa haver algum efeito não mensurável ocasionado pela heterogeneidade das amostras das correntes I e II.

5.2.1 – Concentração gravítica via úmida

Na operação de concentração gravítica por imersão em água, sabe-se que o valor da densidade da água é 1 g/cm³. Os resultados da concentração gravítica, mostrados na Figura 15, são apresentados em percentuais de massa total das amostras encaminhadas para as rotas 1 e 3. O material denominado “leve” corresponde à fração que flutuou

quando colocadas 15 g das PCI's no recipiente, e o material denominado “pesado” corresponde ao material que afundou. Observa-se um aumento na concentração da fração leve, de 40% para 90% (conseqüentemente houve diminuição na concentração da fração pesada de 60% para 10%), com a diminuição da fração granulométrica, em função da menor diferença de densidade das frações mais finas. Houve maior concentração relativa de material leve na faixa granulométrica 0,5 – 0,71 mm na rota 3. Em ambas as rotas se observa um equilíbrio entre o material leve e pesado na faixa granulométrica entre 0,71 – 0,85 mm.

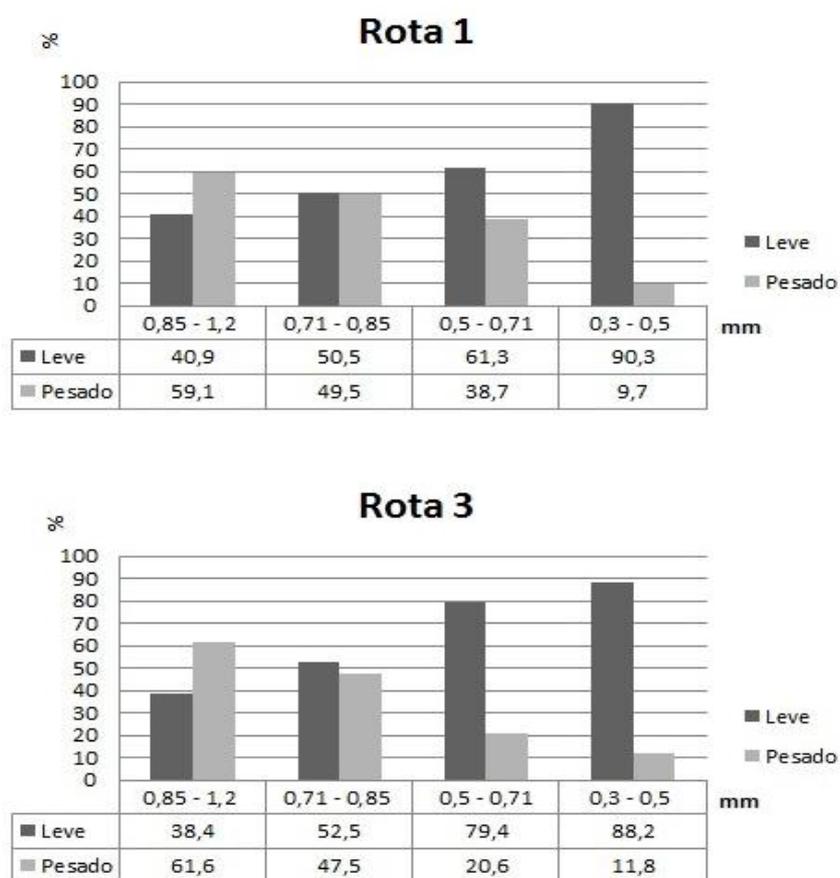


Figura 15 – Resultado da concentração gravítica em percentuais de massa total das amostras para as rotas 1 e 3.

Amostras de todas as frações granulométricas obtidas foram analisadas quimicamente com o intuito de se verificar a concentração dos metais de interesse após a operação de concentração. As porções insolúveis (cerâmicos + polímeros) e solúveis (metais) são mostradas na Figura 16.

Do ponto de vista percentual, o teor de material metálico nas frações pesadas em ambas as rotas é superior a 81% para todas as faixas granulométricas, exceto na faixa granulométrica mais fina (0,3-0,5 mm, de menor densidade), onde as rotas apresentam fração metálica de 66%±1. Com relação à fração leve, houve concentração preferencial de material insolúvel na rota 3 (acima de 70%) e a fração de menor granulometria da rota 1 apresentou maior concentração de material solúvel (84%); nas demais o resultado foi insatisfatório.

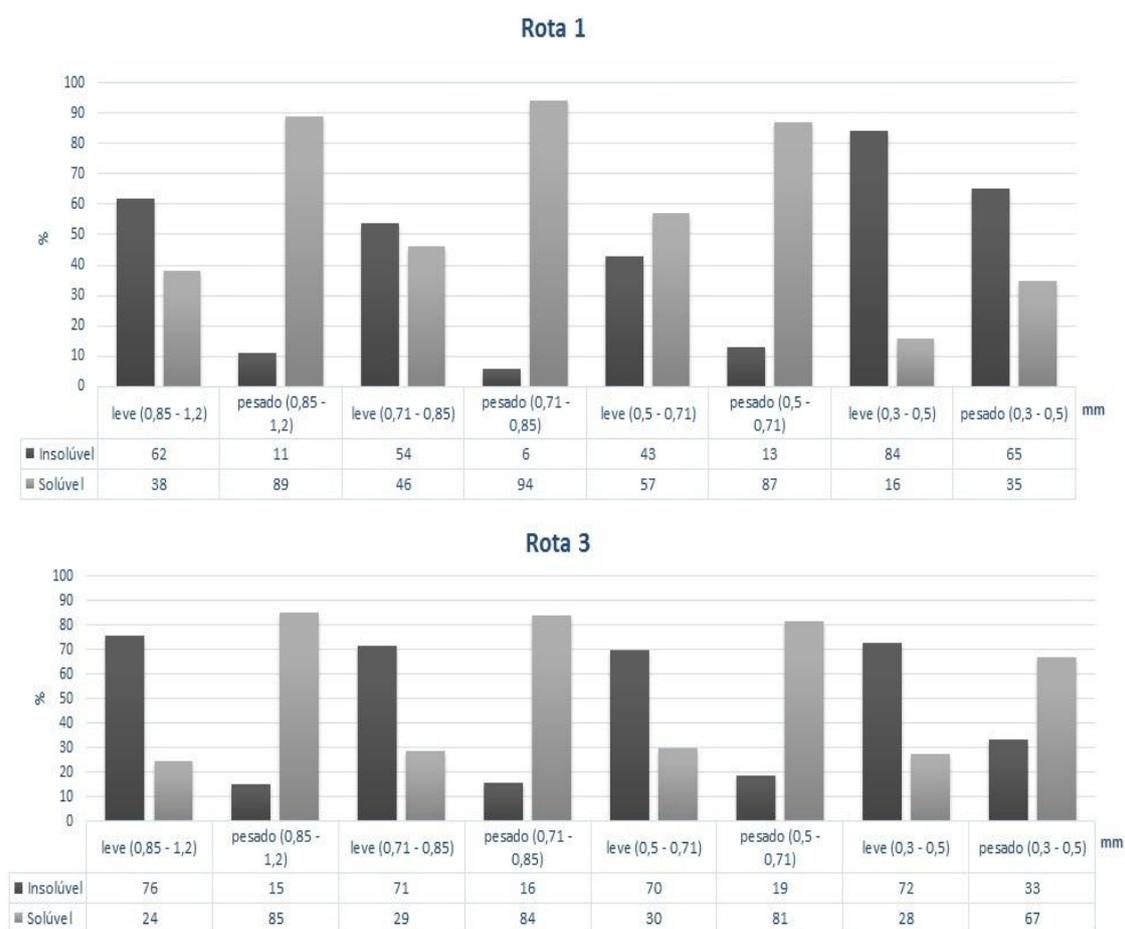


Figura 16 – Porcentagem de material solúvel e insolúvel em água régia presentes nas frações leve e pesada das rotas 1 e 3, por faixa granulométrica.

Os resultados das análises químicas por absorção atômica para concentração dos metais de interesse (cobre, estanho e chumbo) na fração solúvel das rotas 1 e 3 são apresentadas na Figura 17. De uma maneira geral, a rota 3 apresentou melhor desempenho que a rota 1, principalmente para as frações de maior granulometria, uma

vez que concentrou relativamente melhor os metais na fase pesada, com menor proporção de metais na fase leve. Na fração de menor granulometria, ambas as rotas apresentam resultados semelhantes. Os melhores resultados foram obtidos nas faixas granulométricas maiores, entre 0,71-1,2 mm, de maior densidade. Pode-se observar, com base nos teores da fração solúvel, que os valores para os teores de cobre, estanho e chumbo obtidos nas frações pesada e leve diminuí com a redução da granulometria, em ambas as rotas. Nas frações de maior granulometria, é possível concentrar mais do dobro de cobre na fase pesada, além de obter teores de concentração superiores a 10 vezes para estanho e chumbo.

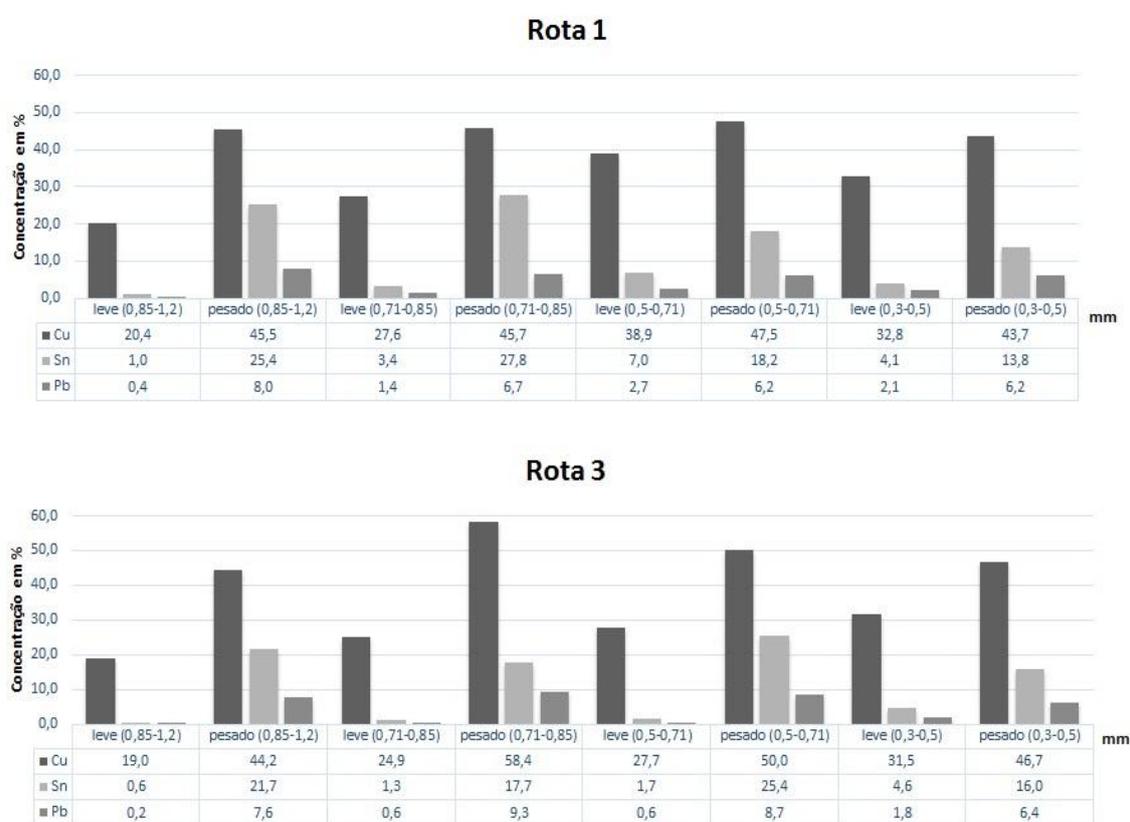


Figura 17 – Distribuição das espécies metálicas cobre, estanho e chumbo na fração solúvel por faixa granulométrica das rotas 1 e 3.

As Tabelas 8 e 9 apresentam a massa das amostras e o conteúdo metálico em percentual para cada faixa granulométrica trabalhada nas rotas 1 e 3, respectivamente. Os valores foram calculados com relação a massa total das amostras (15 g) e as concentrações obtidas por análise química (Figura 16 e 17).

Tabela 8 – Distribuição das frações insolúvel (polímeros e cerâmicos) e solúvel (metais cobre, estanho, chumbo e outros) na rota 1.

Fração leve						
Faixa (mm)	Massa total (%)	Material insolúvel	Material solúvel			
			Conteúdo metálico (%)			
		%	Cu	Sn	Pb	Outros metais
0,85-1,2	10,2	6,3	2,2	0,2	0,0	1,7
0,71-0,85	12,6	6,8	3,5	0,5	0,2	1,7
0,5-0,71	15,3	6,7	6,0	1,0	0,3	1,3
0,3-0,5	22,5	3,7	7,3	1,0	0,5	10,2
Total	60,7	23,5	19,0	2,7	1,0	14,8

Fração pesada						
Faixa (mm)	Massa total (%)	Material insolúvel	Material solúvel			
			Conteúdo metálico (%)			
		%	Cu	Sn	Pb	Outros metais
0,85-1,2	14,8	1,7	6,0	3,3	1,0	2,8
0,71-0,85	12,4	0,7	5,3	3,2	0,8	2,3
0,5-0,71	9,7	1,3	4,0	1,5	0,5	2,3
0,3-0,5	2,5	0,8	0,7	0,0	0,2	0,5
Total	39,3	4,5	16,0	8,0	2,5	8,0

Tabela 9 - Distribuição das frações insolúvel (polímeros e cerâmicos) e solúvel (metais cobre, estanho, chumbo e outros) na rota 3.

Fração leve						
Faixa (mm)	Massa total (%)	Material insolúvel	Material solúvel			
			Conteúdo metálico (%)			
		%	Cu	Sn	Pb	Outros metais
0,85-1,2	9,6	7,3	0,0	0,0	0,0	1,7
0,71-0,85	13,1	9,3	1,0	0,0	0,0	2,7
0,5-0,71	19,9	13,8	1,7	0,0	0,0	4,2
0,3-0,5	22,0	15,8	2,0	0,3	0,0	3,8
Total	64,6	46,3	4,7	0,3	0,0	12,3

Fração pesada						
Faixa (mm)	Massa total (%)	Material insolúvel	Material solúvel			
			Conteúdo metálico (%)			
		%	Cu	Sn	Pb	Outros metais
0,85-1,2	15,4	2,3	6,0	2,8	1,0	3,5
0,71-0,85	11,9	1,8	5,3	1,8	1,0	1,5
0,5-0,71	5,2	1,0	4,0	1,0	0,0	0,7
0,3-0,5	3,0	1,0	0,7	0,2	0,0	0,7
Total	35,4	6,2	16,0	5,8	2,0	6,3

Para rota 1, com base nas Tabela 8, observa-se que a fração leve contém mais cobre, em massa, do que a fração pesada (19% e 16%, respectivamente). E, embora o percentual de material cerâmico e polimérico na fração pesada seja de apenas 4,5%, a fração leve, porém, encontra-se concentrada em metais (37,5%), enquanto a fração

pesada possui 34,5%. Tais resultados indicam a rota 1 como pouco eficaz na separação/concentração das frações metálicas e polímero + cerâmico.

Já a rota 3, de acordo com a Tabela 9, nota-se que a fração leve detém 46,3% de cerâmicos e polímeros, e 17,3% de metais. A fração pesada apresenta 30,1% de metais e apenas 6,2% de material cerâmico e polimérico. Comparativamente, tem-se que a rota 3 se mostrou mais eficiente na concentração dos metais de interesse contidos nas PCI's do que a rota 1.

5.2.2 – Concentração gravítica a seco em coluna zigue-zague

Para utilizar o classificador zigue-zague na separação do material, diagramas de Schytil foram construídos para cada faixa granulométrica utilizando as Equações de 1-8, de modo a determinar a faixa de velocidade do gás (ar) adequada para realizar a concentração a seco. Para a construção do diagrama utilizou-se as densidades apresentadas na Tabela 7 e as partículas foram consideradas esféricas. A Figura 18 apresenta um dos diagramas obtidos para a faixa granulométrica de 0,85-1,2 mm. A vazão mínima e máxima teórica, e experimental obtidas para cada faixa granulométrica na rota 2 e 4 são listadas na Tabela 10. Observa-se que quanto menor o diâmetro das partículas, menor a vazão do ar para proceder sua fluidização. Vale comentar que vazões compreendidas na região de leito fixo não proporcionam o arraste das partículas leves, logo, não são aplicáveis para este tipo de concentração; enquanto vazões muito acima da fronteira leito fixo/transporte pneumático podem levar ao transporte simultâneo das partículas pesadas juntamente com as leves, impossibilitando a separação. Nota-se ainda que a vazão experimental é menor que a vazão teórica, fato este justificável devido ao formato irregular das partículas (conforme observado na Figura 14), e a utilização da porosidade teórica na construção do diagrama de Schytil. As partículas de PCI's possuem formato achatado e/ou de agulha, o que permite que o fator forma seja anulado no classificador em coluna zigue-zague, fazendo com que uma vazão menor consiga arrastar estas partículas em comparação com a vazão submetida à uma partícula esférica. SAGRATZKI (1975) também constatou divergências entre os valores para as velocidades experimentais e as velocidades teóricas indicadas pelo diagrama, e segundo este autor, isso ocorreu devido à não consideração das porosidades reais e fatores de forma correspondentes às frações estudadas.

Tabela 10 – Vazão de alimentação de ar para rota 2 e 4 no classificador zigue-zague em função da faixa granulométrica (teórica e experimental).

Faixa granulométrica (mm)	Rota 2		Rota 4	
	Faixa de vazão teórica de ar (m ³ /h)	Vazão experimental de ar (m ³ /h)	Faixa de vazão teórica de ar (m ³ /h)	Vazão experimental de ar (m ³ /h)
0,85 – 1,20	21,8 – 243,9	18,5	21,9 – 296,6	18,0
0,71 – 0,85	18,0 – 207,9	17,0	17,9 – 246,7	16,5
0,50 – 0,71	11,9 – 155,2	16,5	11,4 – 163,5	15,0
0,30 – 0,50	6,0 – 91,5	13,0	5,8 – 113,7	13,0

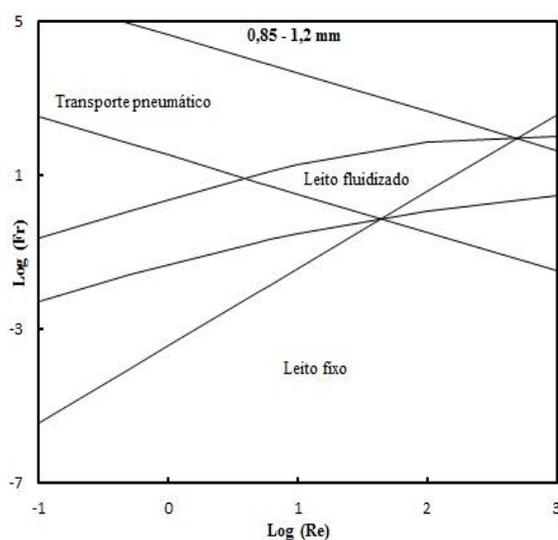


Figura 18 – Diagrama de Schytil da rota 2 para a faixa granulométrica de 0,85-1,2 mm.

Os resultados obtidos na concentração gravítica a seco em coluna zigue-zague, mostrados na Figura 19, são apresentados em percentuais de massa total das amostras encaminhadas para rota 2 e 4. O material denominado “leve” corresponde a fração que foi arrastada pela corrente de ar, o qual espera-se que seja constituído majoritariamente por material cerâmico e polimérico, enquanto o material denominado “pesado” corresponde ao material que não foi carregado pelo fluxo de gás, pois foi depositado diretamente na caixa coletora, o qual se espera que seja composto predominantemente por metais (incluindo cobre, estanho e chumbo, dentre outros). Verifica-se em ambas as rotas um aumento na concentração da fração leve (e conseqüente diminuição na concentração da fração pesada), com a diminuição da fração granulométrica, em função da menor diferença de densidade das frações mais finas.

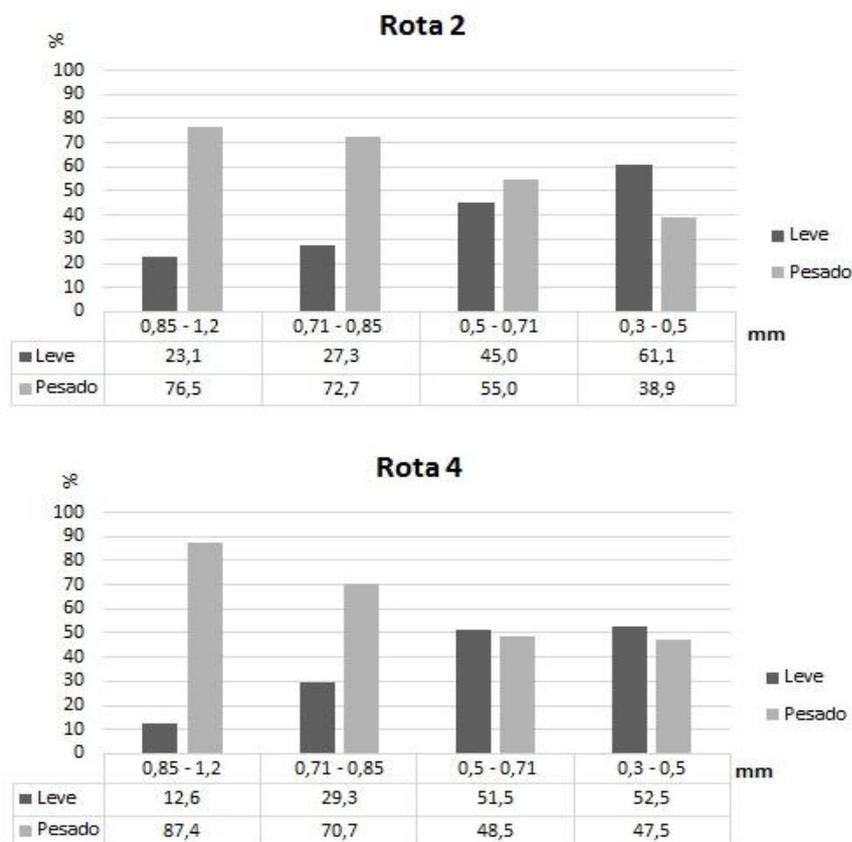


Figura 19 - Resultados da concentração gravítica em coluna zigue-zague em percentuais de massa total das amostras para rota 2 e rota 4.

Observa-se que a proporção percentual do material leve e pesado é semelhante entre as rotas 2 e 4, para as mesmas faixas granulométricas. Nota-se que existe um equilíbrio entre a fração leve e a fração pesada na faixa granulométrica de 0,5–0,71 mm. Verifica-se que o teor de metais é bem maior (acima de 70%) nas faixas granulométricas de maior tamanho (0,85-1,2 mm e 0,71-0,85 mm). O teor de material cerâmico e polimérico é um pouco maior nas faixas de menor granulometria (0,5-0,71 mm e 0,3-0,5 mm).

Amostras de todas as frações granulométricas trabalhadas nesta etapa foram analisadas com o intuito de verificar a concentração dos metais de interesse após a operação de concentração, e assim determinar a rota que apresentou os melhores resultados. As porções insolúveis e solúveis são mostradas na Figura 20.

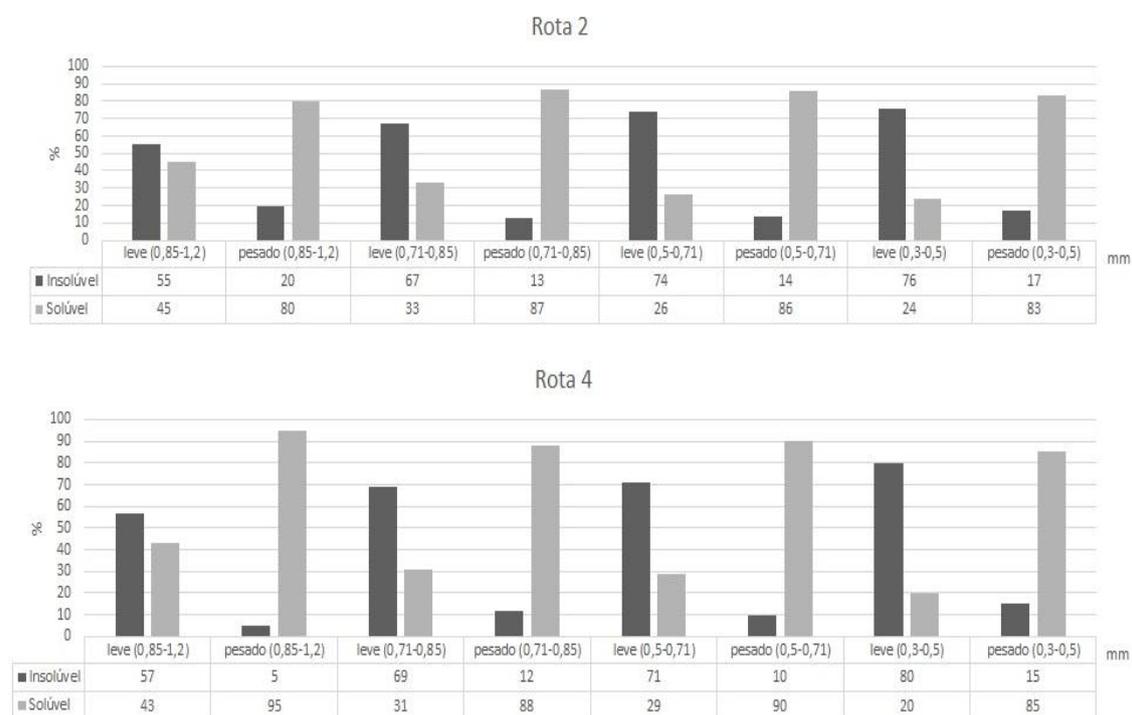


Figura 20 - Porcentagem de material solúvel e insolúvel em água régia presentes nas rotas 2 e 4.

Do ponto de vista percentual, com base na Figura 20, observa-se que as distribuições das frações leve e pesada são relativamente similares entre as rotas 2 e 4. O teor de material metálicos na fração pesada é superior a 80% para todas as faixas granulométricas, chegando a atingir 95% na faixa granulométrica de 0,85-1,2 mm da rota 2. Não se verifica alterações expressivas quando se compara as frações leves das rotas 2 e 4 entre si. Não houve concentração de metais em uma faixa granulométrica específica, estes encontram-se distribuídos em ambas as frações por todas as faixas granulométricas trabalhadas.

As análises químicas foram realizadas a partir do material solúvel nas rotas 2 e 4, os resultados são apresentados na Figura 21.

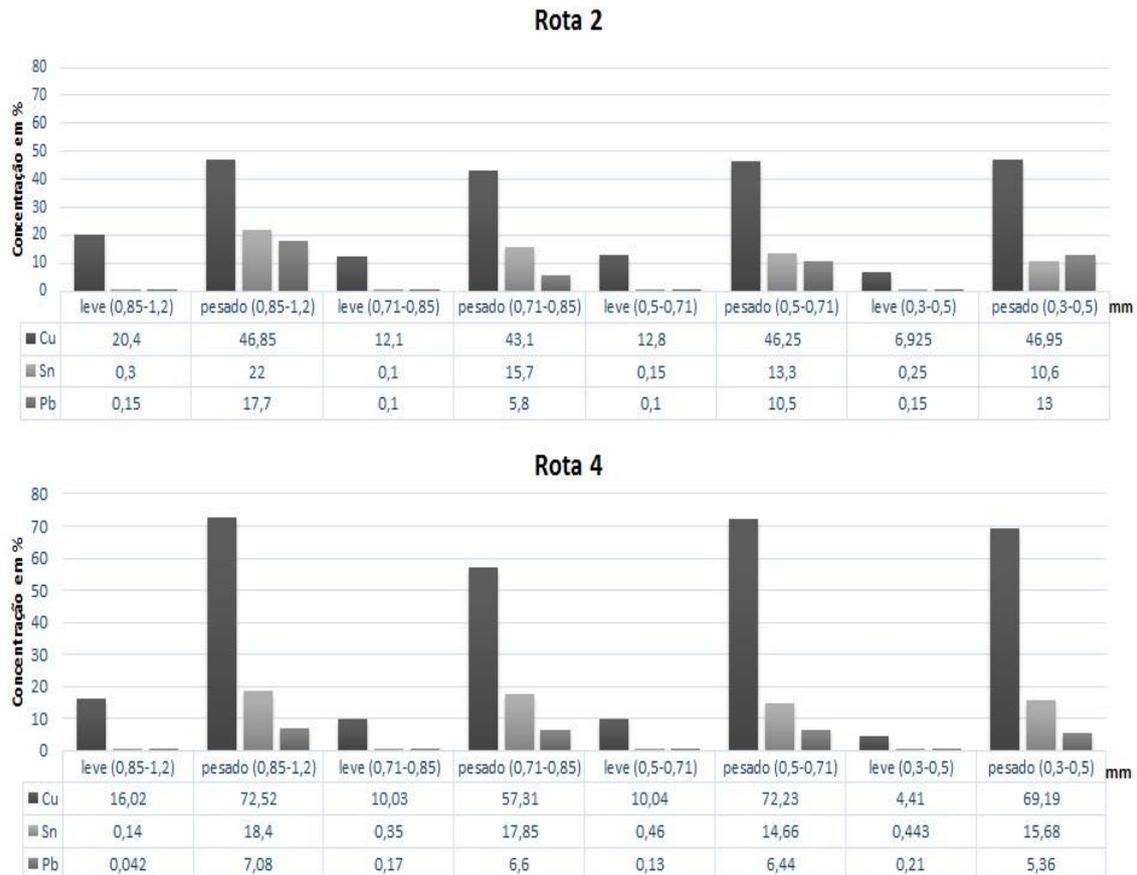


Figura 21 - Distribuição das espécies metálicas cobre, estanho e chumbo na fração solúvel por faixa granulométrica das rotas 2 e 4.

Observa-se, com base na Figura 21, que a rota 4 apresentou melhor desempenho que a rota 2, principalmente para as frações pesadas, uma vez que concentrou melhor os metais nesta fração, com menor proporção de metais na fase leve. Os melhores resultados foram obtidos nas faixas granulométricas 0,85-1,2 mm e 0,5-0,71 mm da rota 4. Com base na fração solúvel, verifica-se na que a concentração de cobre aumenta com a diminuição da granulometria, e que a rota 4 produz melhores resultados para este metal. Quanto ao estanho e chumbo, nota-se que os melhores resultados estão na faixa de maior granulometria (0,85-1,2 mm) da rota 4, e que abaixo desta faixa de tamanho houve uma maior concentração na rota 2, porém, assim como verificado para as outras rotas, a recuperação destes metais diminui com diminuição da granulometria. Estes resultados reafirmam a hipótese de que tenha havido maior perda de cobre quando a separação magnética precedeu a moagem (corrente I).

As Tabelas 11 e 12 apresentam a massa total das amostras encaminhadas para a classificação gravítica a seco (40g) e o conteúdo percentual para cada faixa granulométrica nas rotas 2 e 4, respectivamente, além da fração insolúvel referente aos teores de materiais cerâmicos e poliméricos.

Observa-se que mais de 26% da massa total do material está concentrado na fração leve, independente da rota considerada, que consiste de material cerâmico e polimérico; na fração pesada, a concentração deste material se situou abaixo de 9%. A retirada da fração leve proporciona redução do volume total de material a ser tratado no processo de recuperação dos metais de interesse.

Tabela 11 - Distribuição das frações insolúvel (polímeros e cerâmicos) e solúvel (metais cobre, estanho, chumbo e outros) na rota 2.

Fração leve						
Faixa (mm)	Massa total (%)	Material insolúvel	Material solúvel			
			Conteúdo metálico (%)			
			%	Cu	Sn	Pb
0,85-1,2	5,8	3,2	0,5	0,0	0,0	2,1
0,71-0,85	6,8	4,6	0,3	0,0	0,0	2,0
0,5-0,71	11,3	8,3	0,4	0,0	0,0	2,6
0,3-0,5	15,3	11,6	0,3	0,0	0,0	3,4
Total	39,1	27,6	1,4	0,0	0,0	10,0
Fração pesada						
Faixa (mm)	Massa total (%)	Material insolúvel	Material solúvel			
			Conteúdo metálico (%)			
			%	Cu	Sn	Pb
0,85-1,2	19,2	3,9	7,2	3,4	2,8	2,1
0,71-0,85	18,2	2,4	6,8	2,5	0,9	5,6
0,5-0,71	13,8	1,9	5,5	1,6	1,3	3,6
0,3-0,5	9,8	1,7	3,8	0,9	1,0	2,4
Total	60,9	9,9	23,3	8,3	5,9	13,6

Tabela 12 - Distribuição das frações insolúvel (polímeros e cerâmicos) e solúvel (metais cobre, estanho, chumbo e outros) na rota 4.

Fração leve						
Faixa (mm)	Massa total (%)	Material insolúvel %	Material solúvel			
			Conteúdo metálico (%)			
			Cu	Sn	Pb	Outros
0,85-1,2	3,2	1,8	0,2	0,0	0,0	1,1
0,71-0,85	7,3	5,1	0,3	0,0	0,0	2,0
0,5-0,71	12,9	9,1	0,4	0,0	0,0	3,3
0,3-0,5	13,1	10,5	0,1	0,0	0,0	2,5
Total	36,5	26,5	0,9	0,0	0,0	8,9

Fração pesada						
Faixa (mm)	Massa total (%)	Material insolúvel %	Material solúvel			
			Conteúdo metálico (%)			
			Cu	Sn	Pb	Outros
0,85-1,2	21,8	1,1	15,1	3,8	1,5	0,4
0,71-0,85	17,7	2,1	8,9	2,8	1,0	2,8
0,5-0,71	12,1	1,2	7,9	1,6	0,7	0,8
0,3-0,5	11,9	1,8	7,0	1,6	0,6	1,0
Total	63,5	6,2	38,9	9,8	3,8	5,0

Com relação à fração pesada, observa-se uma maior concentração total de metais na rota 4 (57,5%), onde a concentração de cobre alcançou 38,9%, e estanho 9,8%, apesar do menor teor de chumbo (3,8%). Estes resultados indicam que a sequência de operações unitárias moagem seguida de separação magnética no processamento mecânico de PCI's é mais eficaz do que a sequência inversa. Pode-se observar maior percentual de outros metais na fração leve e pesada da rota 2 (10%) e (13,6%) que na rota 4 (8,9%) e (5,0%), respectivamente.

5.3 Considerações finais

Com base nos resultados obtidos, foi possível estimar a porcentagem de massa recuperável dos metais de interesse através das rotas propostas (Figura 22) e concluir que os melhores valores de recuperação, de maneira geral, foram obtidos com o uso da rota 4. Comparando os resultados da Figura 22 com os resultados apresentados nas Tabelas 5 e 6, nota-se que na rota 1 e rota 3 houve um aumento na concentração do estanho com relação a concentração inicial, que era de 0,45% e ao final do processo obteve-se 2,9% para estas rotas. Na rota 2, estanho e chumbo apresentaram aumento em suas concentrações, partindo de 2,43% e 0,92% para 2,8% e 2,2%, respectivamente. A concentração de material insolúvel também aumentou na rota 3, de 12,5% para 13,3%. A rota 4 proporcionou o aumento da concentração dos três metais de interesse, inicialmente cobre, estanho e chumbo apresentavam concentrações de 10,3%; 2,43% e 0,92%, nesta ordem, ao final do processamento mecânico as concentrações observadas foram de 13,1%, 3,3% e 1,2%. Todos os calculos foram feitos com relação à massa total das amostras de entrada.

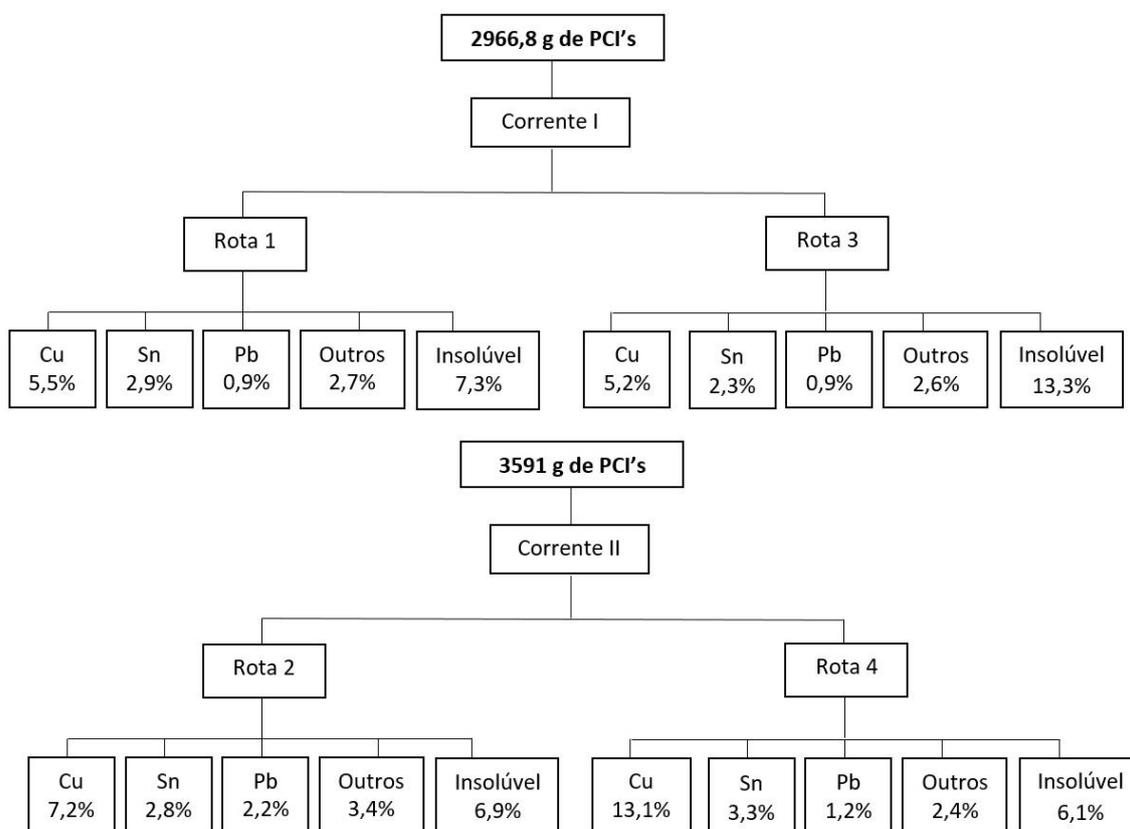


Figura 22 – Resultados obtidos aplicando-se as rotas de processamento propostas.

6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos neste estudo conclui-se que:

- As PCI's de computadores obsoletos coletadas no campus da UFRJ possuem, após desmantelamento manual, cerca de 51% de materiais cerâmicos e poliméricos em sua composição e 49% de metais. As análises de composição química por EDS revelaram que o cobre é o principal metal encontrado nestas placas, enquanto que estanho e chumbo apresentam-se distribuídos em quantidades relevantes. Outros metais como níquel, ferro, zinco, silício e alumínio também estão presentes em sua constituição.
- A sequência das operações unitárias que antecedem a concentração gravítica revelaram que a separação magnética realizada após a moagem resulta em um produto mais concentrado nos metais de interesse.
- As rotas 2 e 4 realizaram a separação do material cerâmico e polimérico de maneira satisfatória. É possível obter maior eficiência de separação alterando parâmetros do classificador tipo zigue-zague.
- A operação de concentração gravítica a seco realizada em um classificador tipo zigue-zague produziu melhores resultados do que a concentração via úmida. Além disso, o processo realizado em uma via úmida gera efluentes que posteriormente necessitam de tratamento antes do descarte ambientalmente adequado; e o produto desta concentração deve ser submetido a um processo adicional de secagem, o que acarretaria em oneração do processo.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 10.004 – *Resíduos Sólidos: Classificação*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2004.
- ABNT NBR 16.156 – *Resíduos de equipamentos eletroeletrônicos: requisitos para atividade de manufatura reversa*. Rio de Janeiro, 2014.
- AKCIL, A., TUNCUK, A., STAZI, V. YAZICI, E. Y., DEVECI, H., “Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: Hydrometallurgy in recycling”. *Minerals Engineering*. v. 25, pp. 28-37. 2012.
- ALERJ, 2015. Disponível em: < <http://www.alerjln1.alerj.rj.gov.br> >. Acesso em: Setembro de 2015.
- BALDÉ, C. P., WANG, F., WONG, J. KUEHR, R., HUISMAN, J. *The Global e-waste monitor – 2014*. United Nations University, IAS-SCYCLE, Bonn, Germany, 2015.
- BERNARDES, A. M., COSTA, A. J. MÜLLER, I. L., “Beneficiation of cobalt, copper and aluminum from wasted lithium-ion batteries by mechanical processing”. *International Journal of Mineral Processing*, pp.77-82, 2015.
- BERNARDES, I. P. T. P.; *Reciclagem de placas de circuito eletrônicos*. Dissertação de Mestrado, Universidade Nova Lisboa, Monte da Caparica, 2009.
- BIDDULPH, M. W., CONNOR, M. A., “A method of comparing the performance of air classifiers”. *Resource, Conservation and Recycling*, pp.275-286, 1989.
- CALDAS, M. P. K., MORAES, V. T., JUNCA, E., TENÓRIO, J. A. S. T., ESPINOSA, D. C. R., “Reciclagem de placas de circuito impresso visando recuperação de prata: estudo de uma rota hidrometalúrgica”. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 12, p. 102-108, São Paulo, 2015.
- CALLISTER, W. D., *Materials Science and Engineering: an introduction*. 6ª Ed., New York, Wiley. John Wiley & Sons. U. S. A., 2003.

CARRISSO, R.C.C. e CORREIA, J.C.G. “Classificação e peneiramento”. In: Luz, A. B., Sampaio, J. A. e Almeida, S. L. M. (Ed.). *Tratamento de minérios*. 4ª ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004.

CASTRO, L. A., MARTINS, A. H.; “Recovery of tin and copper by recycling of printed circuit boards from obsolete computers”. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, Vol.26, n4, pp.649-657, October-December, 2009.

CHEN, M., CHU, Y., CHEN, S., WANG, B., FU, K., CHEN, H., “Micro-copper powders recovered from waste printed circuit boards by electrolysis”. *Hydrometallurgy*, pp. 152-157. 2015.

CIMINELLI, V. S. T.; *Tendências Biológicas Brasil 2015, Geociência e Tecnologia Mineral*, Capítulo 4, Hidrometalurgia p.157-174, 2007.

CONAMA, Resolução nº 452 de 02 de julho de 2012, Ministério do Meio Ambiente.

CONAMA, Resolução nº 401 de 04 de novembro de 2008. Ministério do Meio Ambiente.

CONVENÇÃO DA BASILEIA de 1989. *Convenção sobre o controle de movimentos transfronteiriços de resíduos perigosos e sua eliminação*. Disponível em: <<http://basel.int>>. Acesso em: Janeiro de 2015.

CORTEZ, O. A., *Estudo fluidodinâmico e cinético da ustulação de concentrados de sulfeto de zinco em reator de leito fluidizado*. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2002.

DIRETIVA 2002/95/CE do Parlamento Europeu e do Conselho. *Restrição do uso de determinadas substâncias perigosas em equipamentos elétricos e eletrônicos*. Disponível em: < <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX%3A32002L0095>>. Acesso em: Agosto de 2015.

DIRETIVA 2002/96/CE do Parlamento Europeu e do Conselho. *Resíduo de equipamentos elétrico e eletrônicos (WEEE)*. Disponível em: < <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX%3A32002L0096>>. Acesso em: Agosto de 2015.

Directiva 2011/65/UE do Parlamento Europeu e do Conselho. Restrição do uso de determinadas substâncias perigosas em equipamentos eléctricos e electrónicos. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX%3A32011L0065>>. Acesso em Agosto de 2015.

DUDA, W. H., *Manual Tecnológico Del Cemento, Editores Técnicos Associados S/A*, Barcelona, Espanha, página 142 a 153, 1977.

ELECTRIC APPLIANCE RECYCLING IN JAPAN, INFOM, Inc., November 2003. Disponível em: <http://www.lsi.usp.br/~acseabra/grad/2613_files/Recycling-in-Japan.pdf>. Acesso em Setembro de 2015.

ELLINGHAM, H. J. T., MOORE, S.; “Electrochemistry and electrometallurgy”. *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, p.185-192, 2010.

ESPINOSA, D. C. R., MORAES, V. T., TENORIO, J. A. S., “LCD (liquid crystal display) separation gaming recycling”. *TMS, EPD Congress*. São Francisco. p.1127-1130, 2009.

FIGUEIREDO, P. C., CHAVES, A. P., “Recuperação de partículas minerais finas e ultrafinas no âmbito da concentração gravítica”. *XVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa e 1º Seminário de Química de Colóides Aplicada à Tecnologia Mineral*. São Pedro, Agosto, 1998.

GERBASE, A. E., OLIVEIRA, C. R., “Reciclagem do lixo de informática: uma oportunidade para química”. *Quim. Nova*, vol.35, n7, 1486-1492, 2012.

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.

GUIMARAES, F., RIBEIRO, P. P. M., DUTRA, A. J. B., “Recuperação do cobre contido em placas de circuito impresso”. *Painel PEMM 2012*. PEMM/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Outubro de 2012.

GUPTA, C. K., *Chemical Metallurgy principles and practice*, p.343, India, 2003.

HAYES, P. C., *Process Principles in Minerals and Materials Production*. Hayes Publishing CO. p.29. Brisbane, Austrália, 1993.

HOFFMANN, J. E., “Recovering precious metals from electronic scrap”. *JOM*. v.44, n.7, p.43-48, 1992.

JUNCA, E.; *Estudo da separação e aproveitamento da parte metálica e dos óxidos presentes no resíduo gerado no corte de rochas ornamentais*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.

KARWOWSKA, E., *et al.*, “Bioleaching of metals from printed circuit boards supported with surfactant-producing bacteria”. *Journal of Hazardous Materials*. v. 264, pp. 203-210. 2014.

KIRSCHINER, M.; *Rohs/WEEE Regulations and Standards – RoHS in China*. Conformity Annual Guide, 2007.

LEE, J., YOO, J. M., JEONG, J., KIM, W., “Enrichment of the metallic components from waste printed circuit boards by a mechanical separation process using a stamp mill”. *Waste Management*. v. 29, pp. 1132-1137. 2009.

LEGARTH, J. B., “Environmental decision making for recycling options”. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol.19. p.109-135, 1997.

LUZ, A. B. SAMPAIO, J. A., ALMEIDA, S. L., *Tratamento de minérios*, 5ª edição Revisada e Ampliada. Rio de Janeiro, CETEM-MCT, 2010.

MAIA, E. S., *Pelotização e redução de concentrado magnético*. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011.

MARTINS, A. M., “Recuperação de estanho e cobre a partir da reciclagem de placas de circuito eletrônico de microcomputadores sucataados”. *Estudos Tecnológicos*. v.3, n. 2, p. 124-131, 2007.

MATTHEUS, J., *Mineração Urbana: Tesouros escondidos no lixo eletrônico*. Revista Pré-Univesp. Disponível em: < <http://pre.univesp.br/mineracao-urbana#.V3RdIrgLIV> >. Acesso em: Abril de 2016.

MATTOS, K. M. C., MATTOS, K. M. C., PERALES, W. J. S.; “Os impactos ambientais causados pelo lixo eletrônico e o uso da logística reversa para minimizar os efeitos causados ao meio ambiente”. *XVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, Rio de Janeiro, Outubro de 2008.

MENETTI, R. P., CHAVES, A. P., TENORIO, J. A. S.; “Obtenção de concentrados metálicos não-ferrosos a partir de sucata eletrônica”. In: *Anais do 51º Congresso Anual da ABM*. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. v.4, Porto Alegre, 1996.

MIGUEZ, E. C., *Logística Reversa como solução para o problema do lixo eletrônico: Benefícios Ambientais e Financeiros*. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora, 2012.

MORAES, V. T., Recuperação de metais a partir de processamento mecânico e hidrometalúrgica de placas de circuito impresso de celulares obsoletos. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. pp.119. São Paulo, 2010.

NETO, I. F. F., SOUSA, C. A., BRITO, M. S. C. A., FUTURO, A. M., SOARES, H. M. V. M., “A simple and nearly-closed cycle process for recycling copper with high purity from end life printed circuit boards”. *Separation and Purification Technology*. v. 64, pp. 19-27. 2016.

NITZ, M., GUARDANI, R., “Fluidização gás-sólido – Fundamentos e avanços”. *Revista Brasileira de Engenharia Química*, ABEQ, Dezembro de 2008.

PACHECO, A. M. V., *Eletrorrecuperação de zinco sobre catodo fluidizado numa célula cônica*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1981.

PEIRCE, J. J., WITTENBERG, N.; “Zig-zag configurations and air classifier performance”, *Journal of Energy Engineering*, Vol. 110, nº1, pp. 36-48, 1984.

PEIRCE, J. J., WEINER, R. F., VESILIND, A. P., *Environmental Pollution and control*. 4ª Ed., Butterworth-Heinmann. United State of America, 1998.

PERRY, R. H., GREEN, D. W., MALONEY, J. O., *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. Mc Graw-Hill, 7ª ed. United State of America, 1999.

PNRS, Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010. *Política Nacional de Resíduos Sólidos*. Ministério do Meio Ambiente.

RIBEIRO, G. A. P., “As propriedades magnéticas da matéria: um primeiro contato”. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v22. n.3 p.299-305, 2000. Disponível em <<http://www.sbfisica.org.br>>. Acesso em: Fevereiro de 2015.

RIBEIRO, P. P. M., *Concentração de metais contidos em placas de circuito impresso de computadores descartados*. Monografia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

SAGRATZKI, N. L., *Parâmetros de fluidização do minério de cobre de caraíbas*. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Pontifícia Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1975.

SAITO, I., “Recovery of valuable metals from printed wiring board wastes”. *Trans. Mat. Res. Soc.*, v.18, p.207-214. Japão, 1994.

SAMPAIO, C. H., TAVARES, L. M. M.. *Beneficiamento gravimétrico: uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade*. 1ª edição. Editora UFRGS. 2005.

SCHWEICKARDT, A. R.; *Utilização de um eletrodo poroso percolado pulsado para a recuperação de prata em banhos fotográficos*. Universidade de Brasília, 2006.

SENDEN, M. M. G., *Performance of zigzag air classifiers at low particle concentrations: A study of the effect of stage geometry variations*. Eindhoven University of Technology. Eindhoven, The Netherlands. 1987.

SHAPIRO, M., GALPERIM, V., “Air classification of solid particles: a review”. *Chemical Engineering and Processing*. v.44, pp. 279-285.

SHRIVASTAVA, P., LI, J., ZONG, G., ZHANG, M. C., “Printed circuit board recycling: a state of the art survey”. *IEEE Transaction on electronics packaging manufacturing*. v.27, n.1, p. 33-42, 2004.

SILVA, J. B., *Hidrodinâmica da fluidização de biomassa e inertes em leito fluidizado*. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

SOUZA, N. A. F., *Análise crítica de rotas de processamento de minérios de ferro itabiríticos*. Monografia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2010.

STEBBINS, A. H., *Air classifier*. US Patent 1861248. 1930.

SULLIVAN, G. V., STANCZYK, M. H., “Pneumatic beneficiation of mica”. *14th International Mineral Processing Congress*, v.6, C. I. M., Toronto, 1982.

SUM, E. Y. L., “The recovery of metals from electronic scrap”. *JOM*, p.53-61, abr. 1991.

SZEKELY, J.; THEMELIS, N.J., *Rate Phenomena in Process Metallurgy*, John Wiley & Sons, New York (1971).

VEIT, H. M., *Emprego do processamento mecânico na reciclagem de sucatas de placas de circuito impresso*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. p.1-9 e 97, 2001.

VEIT, H. M., *Reciclagem de cobre de sucatas de placas de circuito impresso*. Tese de doutorado: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

VEIT, H. M., BERNARDES, A. M., FERREIRA, J. S., TENÓRIO, J. A. S.; “Recovery of copper from printed circuit boards scraps by mechanical processing and electrometallurgy”. *Journal of Hazardous Materials*, v. B 137, p. 1704-1709, 2006.

VEIT, H. M., BERNARDES, A. M., BERTUOL, D. A., OLIVEIRA, C. T.; “Utilização de processos mecânicos e eletroquímicos para reciclagem de cobre de sucatas eletrônicas”. *REM: R. Esc. Minas*, Ouro Preto, 61 (2): 159-164, Abr-Jun. 2008.

VESILIND, P. A., HENRIKSON, R. A., “Effect of feed rate on air classifier performance”. *Resources and Conservation*, pp. 211-221. Amsterdam, 1981.

WANG, J., BAI, J, XY, J., LIANG, B., “Bioleaching of metals from printed wire boards by *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidithiobacillus thiooxidans* and their mixture”. *Journal of Hazardous Materials*. v. 172, pp. 1100-1105. 2009.

WIDMER, R., KRAPF, H. O., KTHETRIWAL, D. S., SCHNELLMANN, M., BONI, H., “Global perspectives on e-waste”, *Environmental Impact Assessment Review*, vol.25, n.5, PP. 436-458, 2005.

WILLS, B. A.. *Mineral Processing Technology*. 4th ed. Pergamon Press. Great Britain, 1988.

WILLSCHER, S., “Microbial leaching of metals from printed circuit boards”. *Advanced Materials Research*. Vols. 20-21, 2007.

XAVIER, L. M., *et al.*, *Resíduos eletroeletrônicos na região metropolitana do Recife (RMR): Guia prático para um ambiente sustentável*. 1^a edição. Recife: Editora Massangana, 2014.

XIU, F., YINGUING, Q., ZHANG, F., “Recovery of metals from waste printed circuit boards by supercritical water pre-treatment combined with acid leaching process”. *Waste Management*, pp. 1251-1257, 2013.

YAMANE, L. H., TAVARES, V., ESPINOSA, D. C. R., TENÓRIO, J. A. S.; “Recycling of WEEE: Characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers”. *Waste Management*, v.31, pp. 2553-2558, 2011.

YAMANE, L. H, *Recuperação de metais de placas de circuito impresso de computadores obsoletos através de processo biohidrometalúrgico*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 2012.

YOVANOVIC, A. P., “Sistema Fenomenológico da Cominuição”. In: Engenharia da cominuição e moagem em moinhos tubulares. Belo Horizonte, 2004. Disponível em: < <http://modelooperacional.com.br/VisualizadorPublicacoes.aspx?id=14> >. Acesso em: Novembro de 2015.