MISHENE CHRISTIE PINHEIRO BEZERRA DE ARAÚJO

RECICLAGEM DE FIOS E CABOS ELÉTRICOS

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de Mestre em
Engenharia

São Paulo
2006

MISHENE CHRISTIE PINHEIRO BEZERRA DE ARAÚJO

RECICLAGEM DE FIOS E CABOS ELÉTRICOS

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de Mestre em
Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Orientador:
Prof. Dr. Jorge Alberto Soares Tenório

São Paulo
2006

Dedico esta dissertação à minha querida mãe e à minha irmã, em reconhecimento de tantas renúncias em favor de minha educação. Pela confiança em mim depositada e sobretudo pela paciência com que me apoiaram nos momentos difíceis, sempre com todo amor, admiração, e fé em Deus acima de tudo.

À minha inesquecível tia Socorro Pinheiro, pelo laço divino que nos une e por me apoiar mesmo que de longe.

Ao meu noivo, Paul Cuadros, por seu companheirismo, amor e incentivo. Por estar presente nos momentos importantes da minha vida, valorizando minhas conquistas e ajudando-me a alcançar meus objetivos.

E ao meu grande e misericordioso DEUS, por estar ao meu lado nos bons momentos e me sustentar nos momentos de dificuldade, dando-me força e perseverança de continuar no bom caminho.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Jorge Alberto Soares Tenório pela oportunidade, pelo meu crescimento acadêmico, como também sua orientação, paciência e sugestões valiosas para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Arthur Pinto Chaves pela ajuda, atenção e disponibilização do Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais (LTM) para a realização dos ensaios.

À Prof. Dr. Denise Croce Romano Espinosa pelas dicas em todos os momentos.

À Prof. Dr. Mônica Speck Cassola e aos técnicos Rafael Melchior e Filipe Soares pelo apoio na realização dos ensaios de separação eletrostática feitos no LTMRI – IPT.

Ao CNPq (Processo: 131536/2004-4) pela concessão da bolsa de mestrado.

Ao Alfredo Freitas, técnico do LTM, pela sua amizade, ajuda, sugestões e auxílio laboratorial.

Aos meus amigos do Laboratório de Análises Térmicas (LAT), Adriana, Fernanda, Flávia, Hamilton, Jean, Jonathas, Josie, Márcia, Pedro, Rafael, Renata, Vivian, Viviane e Wagner, que com todo carinho me receberam no laboratório, gostaria de deixar registrado o meu muito obrigada a cada um de vocês por toda força, amizade, festas de aniversário, ajuda nas contagens, caronas, cafés, e muitas outras coisas boas que jamais esquecerei. Como também aos amigos: Dioclézio, Hirdan, Erika, tia Regina Baú e tia Lourdes que externamente me apoiaram bastante.

Aos funcionários e professores do PMT – USP, pela cordialidade, hospitalidade e ensino proporcionado, como também pela recepção com que me receberam, além do importante apoio recebido durante este tempo.

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

SUMÁRIO

Sumário.....	i
Resumo.....	iii
Abstract.....	iv
 1. Introdução.....	 1
 2. Objetivos.....	 3
 3. Revisão bibliográfica.....	 4
3.1. Sucatas eletro-eletrônicas.....	4
3.2. A indústria eletro-eletrônica do Brasil.....	6
3.3. Reciclagem de sucatas eletrônicas.....	7
3.4. Comportamento de metais pesados em aterros.....	9
3.5. Classificação dos fios e cabos.....	9
3.6. Reciclagem de fios e cabos.....	11
3.7. PVC (policloreto de vinila) e o meio ambiente.....	13
3.8. Cobre.....	18
 4. Materiais e métodos.....	 20
4.1. Material de estudo.....	20
4.2. Caracterização do material.....	23
4.3. Determinação do grau de moagem para liberação.....	24
4.4. Ensaio de separação.....	25
4.4.1. Separação granulométrica.....	25
4.4.2. Separação em meio denso.....	26
4.4.3. Separação eletrostática.....	29
4.4.4. Atrição.....	31
4.4.5. Bateamento.....	33

4.4.6. Elutriação.....	34
4.4.7. Ensaio com cabos de alumínio.....	37
5. Resultados e discussão.....	39
5.1. Caracterização do material.....	39
5.2. Separação granulométrica.....	39
5.3. Separação em meio denso.....	48
5.4. Separação eletrostática.....	50
5.5. Atrição.....	53
5.6. Bateamento.....	54
5.7. Elutriação.....	56
5.8. Ensaio com cabos de alumínio.....	58
6. Comparação dos métodos.....	59
7. Estimativa de custo.....	61
8. Conclusões.....	63
Referências bibliográficas.....	65
Lista de figuras.....	72
Lista de tabelas.....	74

RESUMO

A indústria eletro-eletrônica vem aumentando a quantidade de sucatas geradas anualmente. Por este motivo necessita-se de reciclagem, para que se evite o desperdício de matérias-primas e de recursos naturais não-renováveis. A maioria dos produtos eletro-eletrônicos não recebe tratamento pós-consumo sendo depositada em aterros sanitários junto com o resíduo doméstico.

Os resíduos eletro-eletrônicos são caracterizados pela presença de metais distribuídos em placas de circuito impresso, fios e cabos elétricos e componentes eletrônicos em geral. No caso da reciclagem de fios e cabos ainda persistem práticas incorretas, como a queima do plástico para aproveitamento do metal, que elimina o polímero em vez de aproveitá-lo.

A solução para este problema está no reaproveitamento destes metais e polímeros contidos nos resíduos eletro-eletrônicos. Assim, deixarão de ser perdidas quantidades de alumínio, cobre, e polímeros presentes nos cabos, os quais poderão gerar receitas para o processo, já que estes são indispensáveis ao processo de fabricação.

O objetivo deste trabalho é estudar a reciclagem dos cabos tipo cordão paralelo e flexível através de operações unitárias de Tratamento de Minérios. O tratamento da sucata iniciou-se com a seguinte seqüência: moagem, separação granulométrica, separação em meio denso, separação eletrostática, atrição, bateamento e elutriação. Ao final destes processos observou-se que as operações unitárias utilizadas na pesquisa obtiveram concentrados de cobre com baixo grau de contaminação, porém com exceção da elutriação, todas precisam de uma outra técnica para complementá-las. Com os resultados obtidos, concluiu-se que a moagem em moinho de facas com grelha de 3mm seguida de elutriação possibilita a separação do material polimérico, assim como, a obtenção de um concentrado de cobre.

ABSTRACT

The electro-electronics industry follows increasing the amount of scraps annually generated. For this reason it is necessary to recycle, so that it prevents the waste of raw materials and not renovable natural resources. The majority of the electro-electronic products do not receive any treatment after use and is disposed in municipal landfills together with solid wastes (MSW).

The electro-electronic wastes are characterized by metal presence distributed in printed circuits, wires and cables and electronic components in general. In the case of the recycling of wires and cables incorrect practices still persist, as the burning of the plastic for recovery of the metal, thus eliminating the polymer instead of using it to advantage.

The solution for this problem is in the recovery of the metals and polymers contained in the electro-electronic wastes. Thus, amounts of aluminum, copper, and polymers contained in the cables will not be lost, that way they will be able to generate resources for the process, since these substances are indispensable to the manufacture process.

The objective of this work is to study the recycling of the parallel and flexible cables through Mineral Processing unit operations. The treatment of the scrap was initiated with the following sequence: grinding, size classification, density separation, electrostatic separation, attrition, panning and elutriation. To the end of this process concentrate conductor of copper with low degree of contamination were achieved. However, with exception of elutriation, all they need another technique to complement them. With the gotten results, it can be concluded that the milling in knives mill with 3mm grate followed of elutriation makes possible the separation of the polymeric material, as well as, the attainment of a copper concentrate.

1. INTRODUÇÃO

A indústria eletro-eletrônica no Brasil vem crescendo anualmente com índices de crescimento cada vez maiores, e conseqüentemente, o consumo de fios e cabos.

O setor dos equipamentos eletro-eletrônicos está se transformando em uma das mais importantes indústrias nacionais; em 2004, o faturamento deste segmento foi de 27,9 bilhões de dólares americanos, com uma previsão de crescimento de 14,4% para 2005 [1]. Constata-se que no Brasil não há um método ou processamento tecnicamente viável que possa utilizar os produtos eletro-eletrônicos obsoletos ou purificá-los para uma disposição menos agressiva ao meio ambiente. A maioria dos produtos eletro-eletrônicos não recebe nenhum tratamento e é depositada em aterros sanitários ou lixões junto com o resíduo doméstico. A solução para este problema está no reaproveitamento dos metais e polímeros contidos. Assim, deixarão de ser perdidas quantidades de alumínio, cobre, e polímeros, os quais poderão gerar receita, já que estes compostos são indispensáveis ao processo de fabricação. O Brasil consome aproximadamente 3 milhões de t/ano de plástico, onde cerca de 500 mil t são despejadas anualmente em aterros sanitários [2]. Um dos grandes desafios dos sistemas de reciclagem seria a coleta e a separação dos materiais. Cada tipo de polímero possui diferentes propriedades dependendo de sua composição e uso. Por isto, o mercado dos plásticos é limitado pela eficiência de separação mais do que pela demanda de rejeitos [3].

[1] os números entre colchetes reportam-se às referências bibliográficas.

Neste trabalho são estudados os fios e cabos elétricos utilizados na indústria eletro-eletrônica, que fazem parte dos equipamentos eletro-eletrônicos encaixando-se na área dos materiais elétricos de instalação. Em 2004 no Brasil, obteve-se um faturamento de 5.947 milhões de reais nesta área [1]. Em 2003, domicílios particulares com aparelhos eletro-eletrônicos domésticos, como fogão, televisão, e rádio, respectivamente, possuíam em sua totalidade mais de 48, 44,2 e 43,2 milhões de unidades em todo o território, ou seja, 98% dos domicílios brasileiros possuem fogão, 90% televisão e 88% rádio. Outros aparelhos domésticos como a geladeira e a máquina de lavar roupa, em domicílios particulares 87% possuem geladeira e 34% máquina de lavar roupa. Agregados a esses produtos estão os fios e cabos elétricos [1].

2. OBJETIVOS

Esta dissertação tem por objetivo estudar aspectos fundamentais e tecnológicos do processo de reciclagem de fios e cabos elétricos, como também estudar a reciclagem destes tipos de fios através de operações unitárias de Tratamento de Minérios.

Como o objetivo deste trabalho é determinar uma seqüência de operações para a separação do cobre e do material polimérico, ele foi realizado nas seguintes etapas:

- caracterização do material,
- determinação do grau de moagem para liberação,
- ensaios de separação.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Sucatas eletro-eletrônicas

O aumento na demanda mundial por de artigos eletro-eletrônicos gerou o incremento na fabricação e ampliação das linhas de produção destes produtos, além do aparecimento de novas indústrias. O tempo de vida útil destes produtos varia em função do tipo de artigo e das características de operação, por exemplo, a vida útil de um computador pessoal é de três a cinco anos, enquanto que computadores utilizados em empresas têm uma duração média de dois anos [4]. Em 1998, aproximadamente 20 milhões de computadores pessoais tornaram-se obsoletos e somente 13% dessa quantidade foi reciclada na Europa [5].

Estima-se que, em 2005, um computador será obsoleto por cada novo que entre no mercado, e que entre os anos de 1997 e 2004, serão 315 milhões de computadores que se tornarão obsoletos [6]. Um estudo recente da EPA (United States Environmental Protection Agency) indica que aproximadamente 1% do resíduo eletrônico já faz parte do resíduo sólido municipal e, na Europa, o resíduo eletrônico cresce a uma taxa três vezes maior do que a do resíduo sólido municipal [5].

É importante ressaltar que, no mundo, apenas 11% dos produtos eletro-eletrônicos são reciclados, e que aproximadamente 80% dos produtos eletro-eletrônicos coletados nos Estados Unidos para reciclagem, são exportados para países como a China, que possuem leis ambientais menos rigorosas e permitem o acúmulo destes produtos, causando problemas ao

meio ambiente e à saúde humana [7]. Estima-se que aproximadamente 300.000 computadores pessoais se tornam obsoletos a cada ano em Taiwan [8].

Segundo Ogilvie [9], a quantidade futura de equipamentos eletro-eletrônicos obsoletos será de 20kg anualmente por pessoa, dos quais 12kg serão do setor de bens de consumo, 5kg do setor industrial e 3kg de fios e cabos.

Em geral, o resíduo eletro-eletrônico contém diferentes níveis de concentrações de plásticos, óxidos refratários e metais. Menetti [10] classificou o resíduo eletro-eletrônico em três lotes, segundo a porcentagem de cada material contido. Os resíduos que foram estudados foram placas de circuito impresso, componentes de computador, placas de rádio, TV e vídeo. O lote A corresponde a 60% de placas de circuito impresso e 40% de outros componentes de computador, o lote B a 100% de placas de circuito impresso e o lote C a 100% de placas de rádio, TV e vídeo. Estes lotes assim como as porcentagens de cada material encontram-se discriminados na tabela 1.

Tabela 1 – Metais, plásticos e óxidos presentes em diferentes lotes de resíduos eletro-eletrônicos [10]

	plásticos (%)	metais (%)	óxidos (%)
A	36,8	23,0	40,2
B	31,0	23,8	45,8
C	44,8	24,0	31,2

Outros pesquisadores [11,12] generalizaram os resultados da composição de circuitos eletrônicos, compostos basicamente por conexões, chips, transformadores, capacitores, cabos elétricos e resistores, indicando

que o resíduo eletro-eletrônico apresenta 30% de plásticos, 30% de óxidos refratários e 40% de metais.

Em qualquer circuito elétrico que seja considerado nota-se a presença de condutores, que interligam os equipamentos elétricos às fontes e aos demais componentes do circuito. O cobre e o alumínio são os principais condutores utilizados em equipamentos eletro-eletrônicos.

3.2. A indústria eletro-eletrônica do Brasil

No Brasil, a indústria eletro-eletrônica vem crescendo nos últimos anos. A figura 1 mostra a evolução do faturamento deste setor desde 1994 [13]. Nota-se que, em 1998, houve uma leve diminuição do faturamento, voltando a crescer no ano seguinte, podendo se considerar que o faturamento foi praticamente constante de 1997 a 1999.

Figura 1 – Faturamento das indústrias eletro-eletrônicas de 1994 a 2001 [13]

Já para os anos de 2000 e 2001 nota-se um crescimento expressivo no faturamento, de 22% e 15%, respectivamente, o que mostra uma tendência de crescimento. Além disso, a quantidade de empregos gerados pela indústria elétrica e eletrônica também vem crescendo o que indica o crescimento deste setor [13].

3.3. Reciclagem de sucatas eletrônicas

O aumento de bens eletro-eletrônicos teve um crescimento considerável nas últimas décadas. Ampliou-se a variedade de produtos e modelos oferecidos aos consumidores. O mercado atualmente oferece ofertas constantes de novos produtos e por isso a troca de produtos acontece de maneira mais rápida.

Dessa maneira com o passar dos anos o descarte de produtos eletro-eletrônicos obsoletos aumentou.

Os componentes eletrônicos estão dispostos nos mais diversos tipos de materiais. A indústria eletro-eletrônica divide esses materiais para uso doméstico em grandes grupos: linha marrom, linha branca e portáteis. A linha marrom é composta por produtos como vídeo-cassetes, equipamentos de som, DVDs e televisões. A linha branca caracteriza-se por equipamentos de maior tamanho, tais como fogões, micro-ondas, lavadoras e geladeiras. Esta classificação industrial não engloba todos os materiais eletro-eletrônicos de uso doméstico tais como pilhas, baterias e lâmpadas.

Alguns problemas de toxicidade ou de reciclagem são específicos de determinada família de equipamentos. Exemplos disso são as lâmpadas

fluorescentes, que contém Hg, as soldas de circuitos impressos, que contém Pb, e a espuma de poliuretano usada como isolante.

O interesse na recuperação de metais preciosos a partir de equipamentos eletrônicos data de 1969, quando o U.S Bureau of Mines iniciou trabalhos para a recuperação destes metais a partir de sucatas eletrônicas militares, que já naquela época atingiam 9.100 t/ano [14]. Existem vários estudos que indicam a possibilidade de recuperação desses metais preciosos [15, 16 e 17]. Uma tonelada de computadores tem mais ouro do que o que é possível recuperar de 17t de minério [18], e existem várias empresas que fazem a reciclagem de computadores.

Os produtos eletro-eletrônicos têm placas de circuito impresso (PCI) em seu interior que podem chegar a representar até 30% do peso do produto. Para se ter uma noção do tamanho do problema que pode ser causado por placas de circuito impresso, em Taiwan resíduos de PCI chegam a 100 mil t/ano [19].

De acordo com pesquisas realizadas pela Taiwan EPA, em 1998, foram geradas 18 milhões de t/km² por ano em Taiwan, onde 43% desse valor são resíduos da indústria eletro-eletrônica, e estes resíduos são sucatas de cobre, zinco, alumínio e latão [20].

Portanto, a coleta e reciclagem de produtos eletro-eletrônicos é uma necessidade atual, em termos não apenas de se conservar recursos naturais não renováveis através da reciclagem de materiais, mas também de se preservar o meio ambiente e evitar que o impacto ambiental negativo seja cada vez maior neste tipo de produto.

3.4. Comportamento de metais pesados em aterros

Vários dos produtos eletro-eletrônicos, quando se tornam obsoletos, acabam sendo dispostos juntamente com o lixo domiciliar. Alguns desses produtos podem conter metais tóxicos.

No Brasil, a existência de lixões sem nenhum tipo de controle e impermeabilização do solo ainda é uma realidade. Do mesmo modo que no aterro sanitário, há a formação do chorume. Águas que invadem o depósito, como água de chuva, carregam parte do chorume e solubilizam alguns elementos, formando o percolato [21].

Segundo o IPT, em 1998, cerca de 1% do lixo urbano era composto por resíduos contendo materiais tóxicos. Esses resíduos eram provenientes de lâmpadas fluorescentes, termômetros, pilhas, baterias, latas de tinta, latas de inseticida, entre outros produtos [22].

No caso de produtos eletro-eletrônicos, os metais que apresentam preocupação ambiental devido à sua toxicidade são o chumbo, o mercúrio e o cádmio. O mercúrio em sua forma elementar apresenta volatilidade à temperatura ambiente, além disso, pode haver a formação de compostos voláteis.

3.5. Classificação dos fios e cabos

Existem vários critérios para a classificação dos cabos e fios. Neste estudo consideram-se apenas os de maior interesse para a indústria eletro-eletrônica:

a) Classificação quanto à tensão utilizada [23]:

Os cabos de potência se classificam em três categorias em função da tensão em que vão operar:

- Cabos de baixa tensão: para operação em tensões inferiores ou iguais a 1.000V,
- Cabos de média tensão: para operação em tensões maiores que 1.000V e iguais ou inferiores a 35.000V, e
- Cabos de alta tensão: para operação em tensões maiores que 35.000V.

b) Classificação quanto à isolação.

Quanto à isolação, os cabos ou fios elétricos podem ser nus ou isolados.

- Os cabos nus, sem isolação ou cobertura, são geralmente de alumínio, por possuir menor densidade que o cobre e, normalmente utilizados para distribuição e transmissão aéreas.

Os cabos nus podem ser, ainda, de três tipos [23]:

- ◆ Cabos de alumínio: normalmente utilizados em rede de distribuição urbana onde a distância entre os postes (esta distância é conhecida como “vão”) é da ordem de 50m.
- ◆ Cabos de alumínio – liga: caracterizados por possuir alta resistência à corrosão e resistência mecânica superior em relação aos demais cabos de alumínio, e
- ◆ Cabos de alumínio com cabos de aço (ACSR): utilizados em linha de transmissão onde os vãos são superiores a 200m.

- Cabos isolados são aqueles que possuem um conjunto de materiais utilizados para isolar eletricamente o material condutor do meio que o circunda. Usualmente são de cobre devido à elevada condutividade elétrica deste material. São vários os materiais empregados na isolação de condutores [23]:
 - Materiais termoplásticos: utilizados em cabos de baixa tensão onde o critério de dimensionamento é, em geral, por queda de tensão e não por corrente admissível (temperatura máxima admissível 75°C). São eles o policloreto de vinila (PVC) e o polietileno (PE),
 - Materiais termofixos: utilizados em geral, para cabos de média e alta tensão devido à confiabilidade esperada, apresentam temperaturas máximas admissíveis iguais a 90°C.

Os isolantes termofixos não amolecem com o aumento da temperatura como os termoplásticos. Ao atingir uma temperatura máxima (cerca de 250°C), a isolação degrada-se [24]. São eles polietileno reticulado (XLPE), borracha etileno-propileno (EPR) e borracha de silicone.

3.6. Reciclagem de fios e cabos

De uma maneira geral, os fios e cabos produzidos se destinam à fabricação de produtos eletro-eletrônicos, construção civil, indústria automotiva, máquinas, refrigeração, telecomunicações e energia.

Os tipos de resíduos de fios e cabos são:

- Resíduos pré-consumo: São as aparas industriais originadas nas indústrias de fios e cabos (sucata interna);

- Resíduos pós-consumo: Gerados por empresas que utilizam fios e cabos para fazer instalações de redes elétricas, telefonia ou gerados também por empresas que montam equipamentos eletro-eletrônicos, além dos originados durante reformas, conserto de equipamentos que utilizam os fios e cabos, e produtos em final de vida útil quando são descartados.

A origem e estado de conservação (limpeza, por exemplo) dos resíduos definirão o valor de mercado e também algumas características dos produtos reciclados. Os resíduos de fios e cabos gerados antes de chegar ao consumidor são os que despertam maior interesse, tendo por isso um preço mais elevado, por ser um material geralmente limpo e pré-selecionado, o que facilita e evita duas etapas da reciclagem, a lavagem e a secagem do PVC [25].

O processo de reciclagem de fios e cabos é semelhante ao processo de reciclagem de outras sucatas eletro-eletrônicas. Nesse contexto, o êxito para o processo de reciclagem é a liberação dos metais acoplados aos plásticos. Segundo Zhang e Forssberg [26], esta liberação depende da composição da sucata eletro-eletrônica, pois, geralmente os materiais utilizados nas mesmas apresentam uma baixa ligação interfacial.

De acordo com Forssberg e Zhang [27], a liberação de partículas metálicas acontece quase por completo, quando o tamanho da partícula do material moído, encontra-se abaixo de 2mm.

Entre os processos de separação existentes, a separação usando correntes parasitas é um caminho efetivo para remoção de metais não-

ferrosos de resíduos municipais e industriais [28]. Este processo é usado para separar alumínio e cobre de sucatas automobilísticas [29].

Varias técnicas são usadas para a liberação de metais preciosos de sucatas eletrônicas. Entre elas estão: desmantelamento manual, processos mecânicos para beneficiar a sucata, concentrar e recuperar metais preciosos [30].

Para metais de sucatas aeroespaciais que possuem alto valor comercial, a catação convencional não consegue diferenciar materiais com mesmas cores e tamanhos como também algumas ligas de alumínio. Estudos feitos em Taiwan [31] apontam uma técnica para recuperar sucatas não-ferrosas através de uma análise espectrográfica, onde a sucata é identificada sem a intervenção do operador. Esse tipo de análise tem por objetivo separar misturas de sucatas de metais não-ferrosos por tipos. Para a análise utiliza-se fluorescência de raios-x na superfície do material, sendo então identificado à liga em particular [31]. O material depois é separado por catação (“sorting”) em equipamento automático.

3.7. PVC (policloreto de vinila) e o meio ambiente

O PVC é um polímero termoplástico composto por duas matérias-primas básicas: etileno e o cloro. O cloro deriva do NaCl e o etileno provém do craqueamento do petróleo [32].

Há quatro tipos básicos [33]:

- PVC rígido isento de plastificantes = duro e tenaz, com excelentes propriedades térmicas e elétricas. Resistente à

corrosão, oxidação e intempéries. Usados na fabricação de tubos, carcaças de utensílios domésticos e baterias.

- PVC flexível ou plastificado = que contém de 20 a 100 partes de plastificante por 100 de polímero. Usado no revestimento de fios e cabos elétricos, composições de tintas (látex vinílico), cortinas de banheiro etc.
- PVC transparente, isento de cargas.
- PVC celular ou expandido.

É o segundo termoplástico mais consumido em todo o mundo [34] com uma demanda mundial de resina superior a 27 milhões de t/ano de 2001, sendo a capacidade mundial de produção de resinas de PVC estimada em cerca de 31 milhões de t/ano [35].

Desta demanda total, 22% foram consumidos nos Estados Unidos, 22% nos países da Europa Ocidental e 7% no Japão. O Brasil foi responsável pelo consumo de cerca de 2,5% da demanda mundial de resinas de PVC. Estes dados mostram o potencial de crescimento da demanda de resinas de PVC no Brasil, uma vez que o consumo *per capita*, na faixa de 4,0 kg/hab/ano, ainda é baixo se comparado com o de outros países [35].

De acordo com pesquisas realizadas pelo Business Communications Co. Inc. [36], foram utilizados 808 milhões de kg de materiais poliméricos para a indústria de fios e cabos, em 2003, nos Estados Unidos, com previsão de crescimento em 2008 para 948 milhões de kg, uma média anual de aproximadamente 3,2%.

Segundo Vasile [37], o policloreto de vinila é uma das *commodities* plásticas mais importantes, ou seja, se destaca pelo baixo custo e facilidade de processamento, sendo produzido há mais de 50 anos em escala industrial.

Recentemente, plásticos têm sido associados a aplicações eletro-eletrônicas. Sua quantidade chega a 30% da massa dos resíduos eletrônicos. Na Europa componentes plásticos representam 20% de todo o material usado nos equipamentos eletro-eletrônicos [38].

Geralmente estes contêm retardantes anti-chama como compostos halogenados, que podem ocasionar a formação de diferentes produtos tóxicos. A presença do átomo de cloro em sua estrutura molecular torna o PVC um polímero naturalmente resistente à propagação de chamas, contribuindo para aplicações nas quais o retardamento da chama é item desejado, tais como fios e cabos elétricos, eletrodutos e forros/revestimentos residenciais [35].

Reciclagem, incineração e aterros são métodos mais comuns para se dispor estes tipos de plásticos, que também podem ser usados como combustíveis em processos metalúrgicos. Entretanto, durante essa combustão, os retardantes anti-chama halogenados podem produzir dioxinas e furanos [39].

Segundo Menad [39], os resíduos plásticos representam cerca de 60% dos resíduos sólidos municipais, 22% em escala industrial e 3% são gerados em aplicações eletro-eletrônicas. Na Europa, a Alemanha produz 127.000 t/ano de resíduos plásticos gerados no setor eletro-eletrônico, seguida da França e Reino Unido que chegam a produzir 98.000 e 93.000, respectivamente. A Suécia gera 13.000 t/ano [39].

De acordo com companhias suecas, somente 25% dos resíduos plásticos são recicláveis, e comumente, a melhor opção para gerenciar estes resíduos está na sua utilização como combustível durante a fundição do resíduo eletro-eletrônico para a recuperação do cobre e metais preciosos como ouro e prata [24].

A cidade de São Paulo gera diariamente cerca de 13.000t de resíduos sólidos urbanos (não considerados os resíduos inertes), dos quais 5% são resíduos plásticos e deste percentual 6% é PVC [40].

Na tabela 2 [24] verifica-se o rápido crescimento dos plásticos no resíduo sólido municipal dos Estados Unidos, inicialmente duplicando-se até a década de 90, com crescimento intenso nas últimas décadas.

Tabela 2 – Crescimento dos plásticos no resíduo sólido municipal [24]

ano	plástico (%) – resíduo sólido municipal
1960	0,5
1970	2,6
1980	5,0
1990	9,8
1992	10,6
1994	11,2
1995	11,5
1996	12,3

O PVC tem uma participação de cerca de 0,3% no resíduo sólido urbano. Isto significa dizer que são geradas aproximadamente 877 t/dia de resíduo de PVC no Brasil, sendo que deste total 105t são geradas na cidade de São Paulo [41].

A indústria brasileira produz 700 mil t de resina de PVC ao ano, das quais 80% alimentam o setor de construção civil. Trata-se de uma resina com

longo ciclo de vida. A maioria dos produtos onde o PVC é aplicado, são de longa duração, isto é, possuem uma estimativa de vida útil maior que 40 anos [42]. Essa estimativa de vida útil do PVC depende substancialmente da sua finalidade, pois a presença de vários aditivos lhe confere características não comuns a outros polímeros, tais como a mudança de propriedades com o tempo ou o aumento de elasticidade com a temperatura [43].

Por esse motivo, seria falha uma comparação entre a quantidade de PVC produzida e a reciclada. O PVC é a resina de menor presença em aterros sanitários. [44].

A reciclagem do PVC é uma das mais econômicas, e tem como vantagens a preservação de recursos naturais e a possibilidade de redução de resíduos, diminuindo o volume a ser transportado e tratado, assim como, os custos para as empresas [35].

Os principais usos do PVC são [45]:

- tubos e conexões – transporte de água e saneamento básico.
- medicina – embalagens de medicamentos, bolsas e tubos para transfusão de sangue e hemodiálise, artigos cirúrgicos, revestimentos de salas de cirurgia e cateteres.
- construção – perfis de janelas, revestimentos de parede, pisos, calhas, tubos e conexões, revestimento de fios e cabos elétricos e forros.
- embalagens – acondicionamento de alimentos, garrafas de água, frascos para cosméticos e produtos domésticos. Filmes esticáveis e encolhíveis.

- lazer – móveis e mangueiras de jardim, laminados para piscinas e lonas publicitárias, roupas para esportes aquáticos, tecidos espalmados para móveis, vestuário, malas e bolsas etc.
- calçados – solados, palmilhas, cabedais, entresolas, detalhes estéticos e muitas outras partes que conferem conforto e resistência ao produto.
- automóveis – revestimento interno, partes decorativas, chicotes, proteção anticorrosão etc.
- aplicações inovadoras – estruturas de computadores, peças para indústria eletrônica, fibras óticas, persianas, cartões magnéticos, cobaias sintéticas para ensino de microcirurgia e muitas outras.

3.8. Cobre

O cobre e muitas de suas ligas são caracterizadas por terem resistência mecânica associada à ductilidade; estes materiais são apropriados à fabricação de peças e componentes à temperatura ambiente na forma trabalhada de chapas, tiras e arames.

As ligas de cobre são utilizadas em consequência da variedade de suas propriedades: os latões (ligas de cobre e zinco), que é uma das principais ligas de cobre, são moldados e trabalhados facilmente (barras, perfilados e laminados); os bronzes (ligas de cobre e estanho) têm qualidades de fundição, associadas a suas características mecânicas de atrito (fundições, peças mecânicas); os cuproaluminós assim como os

cuproníqueis resistem bem à oxidação e a certos agentes corrosivos. Aplicações particulares são também reservadas às ligas monel, argentão e outras cuproligas (cromo, manganês, berílio e silício) [46].

O cobre é o metal não-ferroso mais utilizado após o alumínio, principalmente, por ser excelente condutor de eletricidade e calor.

Aproximadamente 60% dos metais e ligas produzidos na América do Norte são provenientes de sucatas não-ferrosas [47].

Em geral, o cobre na indústria de fios e cabos é utilizado em cabos de potência de baixa ou média tensão, controle, instrumentação, sinalização, informática e telefonia. Cobre e produtos derivados de ligas de cobre são usados na construção civil (48%), produtos eletro-eletrônicos (21%), equipamentos para transporte (10%), máquinas industriais (10%) e produtos de consumo em geral (11%) [48].

Segundo o *International Copper Study Group*, a produção de cobre refinado mundialmente aumentou de 560.000t para 900.000t em 2004 [49].

Os resíduos eletro-eletrônicos convertidos em ligas e metais refinados fornecem 225.000t de cobre, o equivalente a 9% do consumo aparente. Aproximadamente 94% de todo o cobre produzido sob a forma metálica é reciclável. O cobre refinado ou recuperado através do resíduo contribui em 30% para a fonte de cobre nos Estados Unidos [49].

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Material de estudo

Neste trabalho foram estudados dois tipos de cabos elétricos utilizados na indústria eletro-eletrônica: o cabo flexível e o cordão paralelo; nas figuras 2 e 3 são mostrados estes cabos. Eles são usados em equipamentos eletro-eletrônicos na área dos materiais elétricos de instalação. A escolha se deveu ao fato de serem os mais utilizados no mercado, os mais vendidos, bem como os mais encontrados em eletrodomésticos. Os dois tipos de cabos elétricos foram comprados na empresa Daneva Máquinas e Condutores Elétricos LTDA.

Foi recebido um lote de 40kg de cabos elétricos sendo 20kg de cabo flexível e a outra metade de cordão paralelo.

O cabo tipo flexível apresentou 0,50mm de diâmetro, a cobertura polimérica externa era de PVC e o condutor metálico interno era de cobre. O cabo tipo cordão paralelo teve 0,75mm de diâmetro, em que a dupla cobertura externa foi formada de PVC e a parte interna metálica de cobre. Os cabos foram recebidos na forma de rolos de 100m, as cores do cabo tipo flexível utilizadas na pesquisa foram azul, verde e amarelo, e para o cabo tipo cordão paralelo foi utilizada a cor branca.

Figura 2 – Cabo flexível

Figura 3 – Cordão paralelo

Ao término dos ensaios realizados com os cabos de cobre foram comprados 5kg de cabos de alumínio, tipo multiplex, com cobertura polimérica de polietileno e seção metálica interna de alumínio, o cabo possuía 1,25mm de diâmetro e a coloração utilizada foi preta. A figura 4 mostra o cabo de alumínio após corte feito transversalmente para se observar a parte interna.

Figura 4 – Cabo de alumínio

Para a separação do metal e do plástico, o que corresponde aos ensaios de separação, foram avaliadas as seguintes técnicas:

- separação granulométrica,
- separação eletrostática,
- separação em meio denso,
- bateamento,
- atrição, e
- elutriação.

Na figura 5 tem-se um organograma simplificado dos ensaios realizados.

Figura 5 – Fluxograma simplificado dos ensaios para o tratamento de cabos elétricos

4.2. Caracterização do material

Primeiramente foram separados 3kg de fios e cabos de cada uma das amostras (cabo flexível e cordão paralelo), depois 1m desses cabos foi separado, e através de uma balança analítica o material foi pesado, em seguida, fez-se a separação do polímero e do metal com o auxílio de um estilete para se obter a quantidade de cobre e PVC presentes em cada uma das duas amostras.

Assim, determinou-se a quantidade de metal e de polímero presentes em cada um dos dois materiais, esses resultados foram usados nas operações de separação para se avaliar os rendimentos dos processos estudados.

Foram feitos também ensaios com cabos de alumínio, separou-se 1m desses cabos e a separação do polímero e do metal foi feito da mesma maneira que as amostras de cobre.

Para facilitar a nomenclatura dos ensaios utilizaram-se códigos que podem ser traduzidos como CP (cordão paralelo), CF (cabo flexível), SG (separação granulométrica), MD (separação em meio denso), A (atrição), B (bateamento) e E (elutriação). Por exemplo: CF3B, nesse caso seria traduzido como “ensaio de separação em bateia realizado com cabo flexível moído com granulometria de 3mm”.

4.3. Determinação do grau de moagem para liberação

Foram separados 9kg de cada tipo de cabo, os quais foram processados em moinho de facas. Para a moagem dos fios e cabos elétricos foi utilizado um moinho de facas modelo FA 2305 da marca RONE. Na figura 6 está a foto do moinho de facas utilizado na pesquisa.

Figura 6 – Moinho de facas utilizado para cominuir os cabos elétricos

Inicialmente, antes dos cabos serem moídos, necessitou-se de uma diminuição no comprimento, pois os mesmos estavam separados em rolos de 100m.

Com o auxílio de uma régua e de um alicate, a cada 15cm o material era cortado para facilitar o procedimento seguinte, que seria a moagem.

Foram usadas 3 aberturas de grelhas diferentes, respectivamente 9, 6 e 3mm.

Para cada um dos dois materiais foram processados 3kg para cada grelha.

Após a moagem, cada amostra foi dividida por “cone and quartering” em duas partes opostas. Em seguida, as amostras foram homogeneizadas e quarteadas através do método da pilha alongada. De cada pilha foram retiradas alíquotas para cada um dos ensaios de separação.

A figura 7 ilustra o início da pilha alongada após a moagem.

Figura 7 – Início da pilha alongada

4.4. Ensaios de separação

4.4.1. Separação granulométrica

Após a moagem, coletaram-se 6 alíquotas, 3 para cada tipo de cabo e para cada amostra do determinado cabo tinha-se uma grelha de abertura

diferente (9, 6 e 3mm). Neste trabalho, utilizou-se um peneirador da marca Bertel Indústria Metalúrgica Ltda e peneiras redondas. As telas utilizadas foram de aberturas de: 4,76, 2,83, 1,7, 1,0, e 0,5mm. As amostras foram de aproximadamente 100g cada uma e permaneceram no agitador por 15 min [50].

Ao final de cada ensaio, cada peneira tinha o seu material retido pesado.

Em seguida, através de um procedimento de separação manual com o auxílio de uma pinça, as partículas retidas em cada peneira foram classificadas em 3 categorias, a saber: metal, polímero e metal mais polímero. A categoria “metal mais polímero” deve-se ao fato de que em alguns tamanhos não acontecia a liberação total do material, Portanto, o cobre e o polímero encontravam-se agregados. Após a separação manual faziam-se as pesagens, individualmente, de cada categoria. Assim, para cada peneira foram registrados 3 resultados.

4.4.2. Separação em meio denso

A separação por meio denso é o método gravítico que apresenta um princípio simples, de maior precisão de corte e é um dos métodos mais largamente utilizados.

O princípio é utilizar-se um líquido de densidade controlada e conhecida, que seja intermediária àquelas dos materiais que se deseja separar. O material mais leve flutua e o mais pesado afunda.

O processo de separação em meio denso é mais aplicado industrialmente para partículas de minérios acima de 0,6mm [51].

O meio de separação utilizado pode ser agrupado em quatro tipos diferentes:

- a) meios densos autógenos;
- b) soluções salinas;
- c) suspensóides;
- d) líquidos orgânicos densos [51].

Para estudos de laboratório são utilizados líquidos densos e/ou soluções de sais inorgânicos e, mais raramente, suspensões para o fracionamento de minerais de densidades diferentes.

As principais características de um meio denso ideal são: formar suspensão ou solução estável, não ser corrosivo, possuir baixa viscosidade, não ser tóxico, ser passível de recuperação, ter fácil ajuste de densidade e ter baixo custo.

Em virtude do custo dos líquidos densos é absolutamente necessário fazer a sua reutilização ou recuperação. Os métodos utilizados dependem da natureza do líquido denso.

A separação industrial em meio denso é dividida em dois métodos básicos de separação: o “estático” e o dinâmico.

O processo de separação em meio estático é largamente aplicado quando a diferença de densidades dos materiais ocorre a granulometrias grossas, pois a eficiência de separação decresce com a diminuição do tamanho das partículas, devido à baixa velocidade de sedimentação das partículas [52].

Na prática da separação estática industrial, as partículas a serem separadas devem ter tamanhos acima de 3mm, sendo que o mais comum é 6mm [52].

Nesta etapa do trabalho, utilizaram-se os fios e cabos moídos com granulometrias de 9, 6 e 3mm, provenientes da etapa de moagem, homogeneização e quarteamento.

O meio denso utilizado foi a solução aquosa de cloreto de cálcio com densidade de $1,41 \text{ g/cm}^3$. Para a preparação do líquido foi utilizado um becker de 2l e adicionou-se a este 1,20kg de cloreto de cálcio e 850ml de água. O meio denso era reutilizado a cada ensaio feito. Este valor de densidade foi escolhido, visto que as espécies a separar possuíam densidades $9,6 \text{ g/cm}^3$ (cobre) e $1,21 \text{ g/cm}^3$ (PVC). Os ensaios foram realizados com auxílio de um becker de 1l e utilizou-se uma haste de plástico para a agitação. A amostra foi colocada gradativamente no becker, obtendo-se preponderantemente como flutuado o PVC e o cobre como afundado. O flutuado foi recolhido através de uma peneira manualmente colocada parcialmente submersa na polpa. Efetuou-se uma segunda separação do flutuado em meio denso com o objetivo de aumentar o rendimento da separação, uma vez que na primeira separação observou-se uma contaminação de cobre no flutuado devido ao arraste mecânico de algumas partículas.

Após o final do ensaio foram obtidos dois produtos, o plástico proveniente da segunda etapa de separação e o cobre proveniente da primeira etapa.

Ambos produtos foram lavados em água corrente e colocados para secar na estufa a 40°C por 24 horas. Depois de pesadas, as amostras foram separadas em metal, polímero e metal mais polímero, com o auxílio de uma pinça segundo o procedimento descrito anteriormente.

4.4.3. Separação eletrostática

É um processo de aplicação restrita, só é feita a seco, e é um processo sensível à presença de umidade nas partículas ou na atmosfera, à vazão de alimentação e à granulometria, por problemas de arraste mecânico.

Recentemente vem ganhando importância no processamento de sucatas (separação de metais e plásticos).

Os separadores eletrostáticos são usados para separar materiais condutores de não-condutores. A diferença entre a condutividade elétrica entre metais e não-metais proporciona uma condição para a implementação com sucesso de um separador eletrostático em reciclagem de resíduos. Esta separação tem sido principalmente utilizada para separar cobre ou alumínio de fios e cabos elétricos picados e também na recuperação de cobre e metais preciosos de sucatas de placas de circuito impresso [53].

Além desses mecanismos, existe a técnica chamada de correntes induzidas, em que magnetos girantes geram cargas induzidas nas partículas pelas diferenças de condutividade, com isso materiais ferrosos e não-ferrosos podem ser separados [54].

A movimentação de uma partícula condutora dentro de um campo magnético variável gera uma corrente induzida na partícula. A força atuante

na partícula pela variação do campo magnético é usada para separar as partículas. Partículas condutoras são desviadas enquanto partículas não condutoras não são desviadas.

O separador de corrente induzida é utilizado em operações de recuperação de alumínio, estanho, cobre, que se encontrarem misturados a plásticos, vidro, sucata eletrônica, materiais gerados em moagem de automóveis, assim como, é aplicado na remoção de metais não-ferrosos em instalações de reciclagem de garrafas de vidro, e em unidades de reciclagem de lixo [55].

Neste trabalho utilizou-se um separador eletrostático marca Carpco, Inc – EUA, Modelo: HT (15, 25,36) III-15 (Figuras 8 e 9) do IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais (LTMRI).

Figura 8 – Separador eletrostático Carpco

Figura 9 – Detalhe do separador eletrostático Carpco

Para os ensaios de separação eletrostática foram separadas 6 amostras de aproximadamente 300g cada uma, 3 amostras do cabo tipo cordão paralelo e 3 do cabo tipo flexível, as granulometrias foram de 9, 6 e 3mm para cada amostra dos dois modelos de cabos.

A alimentação das amostras ao sistema foi feita de forma gradual, variando a abertura do divisor de acordo com a granulometria do material a ser realizado. Ao final de cada ensaio as amostras foram classificadas em: condutor, não-condutor e intermediário. Após a classificação, cada material foi pesado e separado com o auxílio de uma pinça em polímero, metal e polímero mais metal.

4.4.4. Atrição

O processo de atrição também conhecido como escrubagem, é a operação na qual ocorre a separação de grãos unidos por material argiloso, por precipitados salinos, ou por material semelhante, pela ação de forças

relativamente fracas. O processo é o resultado do atrito entre grãos de durezas elevadas, em polpa sob intensa agitação [56].

Na célula em que ocorre a atrição ocorre a lavagem e, principalmente, a limpeza das superfícies dos grãos por meio de intensa atrição entre as próprias partículas e entre a massa como um todo.

Na célula o agitador é do tipo vertical centrado e a entrada é feita pelo topo. Na haste existem duas pás helicoidais perfiladas, essas pás em conjunto, atuam produzindo fluxos em sentidos contrários [57]. Devido a essa inversão de sentidos, a polpa movida por uma das hélices tem sentido oposto ao do fluxo movido pela outra hélice, causando a atrição das superfícies das partículas. Na figura 10 observa-se o esquema da máquina de atrição.

Figura 10 – Esquema da máquina de atrição [57]

As amostras de fios e cabos elétricos foram submetidas a ensaios de atrição, com a intenção de obter maior liberação do material que, em algumas frações granulométricas, encontrava-se ainda agregado.

Ao final do tempo de agitação, cada amostra foi colocada em um recipiente para a retirada do material flutuado, o material afundado foi

separado em um outro recipiente e ambos foram colocados para secar na estufa a 40°C por 24 horas. Depois de secadas, as amostras foram pesadas e separadas manualmente com o auxílio de uma pinça em metal, polímero e metal mais polímero.

4.4.5. Bateamento

A bateia é um equipamento do século XVIII, circular e levemente afunilado, em geral de madeira ou aço, utilizado para extrair diamante do cascalho em garimpo, ouro, estanho, tantalita, pirita, enfim, mineral pesado.

Na figura 11 tem-se a foto da bateia.

O processo de concentração gravitacional por meio de bateamento manual, foi um dos processos utilizados na pesquisa para a separação do cobre e PVC. O equipamento foi cedido pelo LTM – EPUSP, Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Os ensaios foram realizados com 6 amostras previamente quarteadas dos dois tipos de cabos e com as mesmas granulometrias anteriores (3, 6 e 9mm), com o auxílio de uma bacia plástica com água, colocou-se a amostra na bateia e em seguida imergiu-se a bateia pela metade na bacia e vagarosamente em movimentos circulares foi separando o PVC que caía já na bacia com água e o cobre que permanecia na bateia.

Figura 11 – Concentração gravitacional por meio de bateamento

Os produtos leves e pesados dos seis tipos de amostras foram separados e colocados para secar na estufa a 40°C por 24 horas. Posteriormente foram pesados e com uma pinça foram separados em metal, polímero e metal mais polímero.

4.4.6. Elutriação

O elutriador é o aparelho de separação granulométrica cujo princípio de funcionamento é a elutriação. O minério, na forma de polpa aquosa, é submetido a uma corrente de fluido ascendente, cuja velocidade arraste as lamas em suspensão com sua subsequente separação (transbordamento). O material deslamado é sedimentado, sendo então removido, através de bombeamento ou outros processos.

Para os ensaios de elutriação foram usadas amostras de aproximadamente 200g. Cada ensaio usou cerca de 100l de água em uma vazão de aproximadamente 85 ml/s. Com o auxílio de uma haste o material foi jogado para dentro do elutriador de vidro, logo em seguida o cobre descia e o PVC subia seguindo a corrente de água para o recipiente onde era

coletado. Na metade do ensaio era feita uma interrupção para a retirada do cobre que se sedimentava no fundo do elutriador. A dificuldade do ensaio foi a alimentação do sistema, para tanto o material foi previamente desemaranhado manualmente. O equipamento foi cedido pelo LTM – EPUSP, utilizado em escala laboratorial. As figuras 12 a 14 mostram algumas partes do elutriador e como se comporta o material ensaiado.

Figura 12 – Início do ensaio de elutriação

Figura 13 – O PVC subindo e o cobre afundando

Figura 14 – Cobre sedimentado no fundo do elutriador

Ao término do ensaio, a amostra foi separada em afundado e flutuado e colocada para secar na estufa a 40°C por 24 horas. Em seguida, após a secagem, pesaram-se as amostras e com o auxílio de uma pinça, estas foram separadas em: metal, polímero e metal mais polímero.

4.4.7. Ensaio com cabos de alumínio

Inicialmente foram picados 1,80kg de cabos de alumínio tipo multiplex, com cobertura de polietileno e seção metálica de alumínio no moinho de facas com grelha de abertura de 6mm. Em seguida, a amostra foi homogeneizada e quarteada, separou-se aproximadamente 300g da mesma para se misturar a 300g de cabos de cobre moídos do tipo cordão paralelo, com grelha de abertura de 6 mm.

As duas amostras de cabos moídos de cobre e alumínio foram então misturadas e processadas novamente em moinho de facas, com abertura de grelha de 3mm. Ao final quarteou-se a amostra em alíquotas de aproximadamente 100g e foi feito um ensaio com uma das 4 amostras com o método de separação em meio denso utilizando a solução aquosa de cloreto de cálcio com densidade de 1,43 g/cm³. Para a preparação da solução foi utilizado um becker de 1l e acrescentou-se a este 1kg de cloreto de cálcio e 700 ml de água. O ensaio foi realizado com o auxílio de um becker de 1l e de uma haste plástica para a agitação. A amostra foi colocada no recipiente obtendo-se como afundado o cobre e o alumínio, e como flutuado o polietileno e o PVC. Com o material afundado foi realizado o ensaio de

separação em meio denso utilizando bromofórmio com densidade de 2,79 g/cm³, com o propósito de se conseguir a separação dos dois metais.

O material flutuado foi colocado em outro becker com água como meio denso e graças a densidades de 0,98 g/cm³ (polietileno) e de 1,21 g/cm³ (PVC) conseguiu-se separar os dois plásticos.

Os 4 materiais separados foram lavados em água corrente e colocados para secar na estufa a 40°C por 24 horas. Depois de pesadas, as amostras foram separadas em alumínio, cobre, polietileno e PVC com o auxílio de uma pinça. A distinção entre os dois tipos de polímeros aconteceu devido a coloração.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização do material

Na tabela 3 tem-se o resultado da quantidade de metal e de polímero presente em 1m de cada um dos dois tipos de cabos elétricos.

Tabela 3 – Resultado da quantidade de metal e polímero presente nos dois tipos de cabos

ensaio	PVC (%)	cobre (%)
cordão paralelo	54,8	45,2
cabo flexível	55,4	44,6

Na tabela 4 tem-se o resultado da quantidade de metal e de polímero presente em 1m de cabo de alumínio tipo multiplex.

Tabela 4 – Resultado da quantidade de metal e polímero presente no cabo de alumínio

ensaio	PE (%)	alumínio (%)
cabo de alumínio	44,2	55,8

5.2. Separação granulométrica

Nas figuras 15 a 17 mostra-se a diferença entre os três produtos obtidos após a moagem do cabo tipo flexível. Para a moagem usando a grelha com abertura de 9mm houve pouca liberação do cobre e do PVC, enquanto que na

de 6mm obteve-se melhor liberação, e para a granulometria de 3mm os dois tipos de cabos ficaram praticamente 100% liberados.

Figura 15 – Aspecto do material obtido após a moagem do cabo tipo flexível em moinho de facas com grelha de abertura de 9mm

Figura 16 – Aspecto do material obtido após a moagem do cabo tipo flexível em moinho de facas com grelha de abertura de 6mm

Figura 17 - Aspecto do material obtido após a moagem do cabo tipo flexível em moinho de facas com grelha de abertura de 3mm

Observou-se que na figura 15 há uma quantidade maior de cobre do que nas figuras 16 e 17 devido às amostras com grelhas de abertura de 9 e 6mm não estarem liberadas.

Nos 6 ensaios de separação granulométrica foram quarteadas amostras de aproximadamente 100g.

Na tabela 5 e na figura 18 apresentam-se os resultados da separação manual dos ensaios feitos com o cabo tipo cordão paralelo na separação granulométrica com abertura de grelha de 9mm.

Tabela 5 – Resultados da separação manual da separação granulométrica com CP – 9mm

abert. peneira (mm)	% passante total	cobre (%)	PVC (%)	cobre + PVC (%)	% peso total
+ 4	99,7	23,6	32,8	2,5	58,9
- 4 + 2,83	40,8	4,3	12,9	0,0	17,2
- 2,83 + 1,7	23,6	2,1	5,2	0,0	7,3
- 1,7 + 1	16,3	8,3	1,5	0,0	9,8
- 1 + 0,5	6,5	4,8	0,3	0,0	5,1
- 0,5	1,4	0,97	0,4	0,0	1,4
total (%)	0,0	44,1	53,1	2,5	99,7

Figura 18 – Separação granulométrica com o cabo tipo cordão paralelo com grelha de abertura de 9mm

Na tabela 5 verificou-se que para a grelha de 9mm, para o cabo tipo cordão paralelo, obteve-se 2,5% de PVC agregado ao cobre. Isto significa que o material não foi totalmente liberado.

Na tabela 6 e na figura 19 apresentam-se os resultados dos ensaios feitos com o cabo tipo cordão paralelo na separação granulométrica com abertura de grelha de 6mm.

Tabela 6 – Resultados da separação manual da separação granulométrica com CP – 6mm

abert. peneira (mm)	% passante total	cobre (%)	PVC (%)	cobre + PVC (%)	% peso total
+ 4	99,8	6,6	2,3	0,5	9,4
- 4 + 2,83	90,4	2,9	19,0	0,5	22,4
- 2,83 + 1,7	68,0	3,9	32,7	0,2	36,8
- 1,7 + 1	31,2	9,1	2,4	0,0	11,5
- 1 + 0,5	19,7	7,3	0,2	0,0	7,5
- 0,5	12,2	12,0	0,2	0,0	12,2
total (%)	0,0	41,8	56,8	1,2	99,8

Figura 19 – Separação granulométrica com o cabo tipo cordão paralelo com grelha de abertura de 6mm

Observou-se que, com a granulometria de 6mm, houve uma diminuição na quantidade de PVC e cobre juntos. Na faixa granulométrica $-2,83 + 1,7\text{mm}$ tem-se 36% da amostra onde 32% é só de PVC, o cobre teve maior concentração na granulometria abaixo de 0,5mm. Nesse ensaio verificou-se também que nas faixas granulométricas $-4 + 2,83$ e $-2,83 + 1,7\text{mm}$ aumentou o grau de contaminação para 0,5 e 0,2% quando comparado com o ensaio anterior de 9mm, que na mesma faixa aparece com zero comprovando que o material em ambas granulometrias não se encontrava liberado.

Na tabela 7 e na figura 20 têm-se as separações e diferenças de peso dos ensaios feitos com o cabo tipo cordão paralelo na separação granulométrica com abertura de grelha de 3mm.

Tabela 7 – Resultados da separação manual da separação granulométrica com
CP – 3mm

abert. peneira (mm)	% passante total	cobre (%)	PVC (%)	cobre + PVC (%)	% peso total
+ 4	99,7	3,7	0,2	0,0	3,9
- 4 + 2,83	95,8	2,2	0,4	0,0	2,6
- 2,83 + 1,7	93,2	18,1	35,6	0,0	53,7
- 1,7 + 1	39,5	8,3	15,3	0,0	23,6
-1 + 0,5	15,9	5,3	1,2	0,0	6,5
- 0,5	9,4	8,8	0,6	0,0	9,4
Total (%)	0,0	46,4	53,3	0,0	99,7

Figura 20 – Separação granulométrica com o cabo tipo cordão paralelo com
grelha de abertura de 3mm

Na tabela 7 verificou-se que, com a moagem até 3mm, os fios e cabos elétricos encontraram-se 100% liberados no cabo tipo cordão paralelo. O PVC continuou concentrado na faixa de – 2,83 + 1,7mm juntamente com o cobre.

Nas tabelas 8 a 10 estão apresentados os resultados da separação manual dos ensaios feitos com o cabo flexível respectivamente para as grelhas com abertura de 9, 6 e 3mm.

Da mesma forma as curvas de separação granulométrica para as grelhas de 9, 6 e 3mm estão mostradas nas figuras 21, 22 e 23.

Tabela 8 – Resultados da separação manual da separação granulométrica com
CF – 9mm

abert. peneira (mm)	% passante total	cobre (%)	PVC (%)	cobre + PVC (%)	% peso total
+ 4	99,7	11,4	4,7	10,1	26,2
- 4 + 2,83	73,5	3,9	12,2	1,5	17,6
- 2,83 + 1,7	55,9	3,4	35,6	0,7	39,7
- 1,7 + 1	16,2	6,4	3,2	0,0	9,6
- 1 + 0,5	6,6	4,6	0,2	0,0	4,8
- 0,5	1,8	1,7	0,1	0,0	1,8
total (%)	0,0	31,4	56,0	12,3	99,7

Figura 21 – Separação granulométrica com o cabo tipo flexível com grelha de
abertura de 9mm

Na tabela 8, o cabo flexível apresentou 12% de PVC e cobre agregados comportando-se pior do que o cordão paralelo quanto a liberação em 9mm.

Na tabela 9 apresentam-se os resultados da separação manual dos ensaios feitos com o cabo flexível na separação granulométrica com abertura de grelha de 6mm.

Tabela 9 – Resultados da separação manual da separação granulométrica com CF – 6mm

Abert. peneira (mm)	% passante total	cobre (%)	PVC (%)	cobre + PVC (%)	% peso total
+ 4	99,7	15,6	3,3	5,7	24,6
- 4 + 2,83	75,1	3,5	5,4	1,3	10,2
- 2,83 + 1,7	64,9	4,0	35,4	1,1	40,5
- 1,7 + 1	24,4	8,7	4,1	0,0	12,8
-1 + 0,5	11,6	6,6	0,5	0,0	7,1
- 0,5	4,5	4,4	0,1	0,0	4,5
total (%)	0,0	42,8	48,8	8,1	99,7

Figura 22 – Separação granulométrica com o cabo tipo flexível com grelha de abertura de 6mm

Na tabela 9, verificou-se que o cabo flexível continua a ter menor liberação que o cordão paralelo também nessa granulometria, o PVC na faixa –

2,83 + 1,7mm concentrou-se com 35,4% da amostra total pesada que no caso foi 40,7g. Correspondendo a 87% dessa amostra, esse fato aconteceu também com o cordão paralelo.

A seguir a tabela 10 e a figura 23 apresentam os valores dos ensaios feitos com o cabo flexível na separação granulométrica com abertura de grelha de 3mm.

Tabela 10 – Resultados da separação manual da separação granulométrica com CF – 3mm

abert. peneira (mm)	% passante total	cobre (%)	PVC (%)	cobre + PVC (%)	% peso total
+ 4	98,8	3,7	0,2	0,0	3,9
- 4 + 2,83	94,9	0,7	0,3	0,0	1,0
- 2,83 + 1,7	93,9	0,5	12,9	0,0	13,4
- 1,7 + 1	80,5	16,4	35,1	0,0	51,5
- 1 + 0,5	29,0	7,3	3,9	0,0	11,2
- 0,5	17,8	17,0	0,8	0,0	17,8
total (%)	0,0	45,6	53,2	0,0	98,8

Figura 23 – Separação granulométrica com o cabo tipo flexível com grelha de abertura de 3mm

Através desses resultados apresentados na tabela 10 verificou-se que no cabo flexível ocorre total liberação entre o cobre e o PVC e ocorre uma maior concentração na faixa – 1,7 + 1mm com mais de 50%. No entanto, a separação granulométrica não é um bom método devido as amostras independente de granulometria se apresentarem contaminadas.

5.3. Separação em meio denso

As tabelas 11, 12, 13 e 14 mostram os resultados da separação em meio denso para os dois tipos de cabos elétricos com as três granulometrias diferentes.

Tabela 11 – Valores da separação em meio denso no CP – afundado

ensaio	massa afundado (%)	% Cu afundado	% PVC afundado	% PVC + Cu
CP9MD	45,7	98,4	0,4	1,2
CP6MD	46,2	97,6	1,5	0,9
CP3MD	44,5	98,9	1,1	0,0

Tabela 12 – Valores da separação em meio denso no CP – flutuado

ensaio	massa flutuado (%)	% PVC flutuado	% Cu flutuado	% PVC + Cu
CP9MD	54,3	98,2	0,0	1,8
CP6MD	53,8	99,7	0,0	0,3
CP3MD	55,5	100,0	0,0	0,0

Tabela 13 – Valores da separação em meio denso no CF – afundado

ensaio	massa afundado (%)	% Cu afundado	% PVC afundado	% PVC + Cu
CF9MD	53,8	71,9	1,0	27,1
CF6MD	51,7	80,8	5,2	14,0
CF3MD	47,4	93,6	6,4	0,0

Tabela 14 – Valores da separação em meio denso no CF – flutuado

ensaio	massa flutuado (%)	% PVC flutuado	% Cu flutuado	% PVC + Cu
CF9MD	46,2	96,8	0,0	3,2
CF6MD	48,3	98,0	0,0	2,0
CF3MD	52,6	100,0	0,0	0,0

Observou-se que as tabelas mostram a contaminação de PVC nas amostras de cobre e de cobre nas amostras de PVC. As amostras com cordão paralelo com grelha de 9 e 6mm encontram-se ambas contaminadas.

Os ensaios realizados com abertura de grelha de 3mm apresentaram-se 100% liberados, comprovando que com 3mm o material pode ser separado, nas amostras dos dois tipos de cabos onde encontram-se as partes flutuadas não se teve contaminação de cobre nos ensaios. No caso da tabela 11 tem-se 1,2% de contaminação do PVC na amostra de cobre.

Os ensaios realizados com os cabos do tipo flexível apresentaram um comportamento semelhante quanto as amostras de 6mm do cordão paralelo, as mesmas não estão liberadas, mas apresentaram um baixo grau de contaminação.

Segundo HEGBERG [58] os limites aceitáveis de contaminantes não-plásticos são:

- 0% metais,
- < 0,005% - < 3% não-plásticos.

E os limites de contaminantes plásticos são:

- < 1% - < 5% outros plásticos.

Na tabela 13 observou-se que existe uma contaminação de 6,4% de PVC no cobre. O comportamento do cabo flexível e do cordão paralelo nas amostras de PVC apontou resultados onde a contaminação continua sendo inexistente.

5.4. Separação eletrostática

Nas tabelas 15 a 17 encontram-se os resultados de separação manual feita no cabo tipo cordão paralelo com ensaios de separação eletrostática em cada uma das classificações.

Tabela 15 – Resultados das amostras do cordão paralelo com abertura de 9mm na separação eletrostática

fração	PVC (%)	cobre (%)	PVC + cobre (%)	massa (%)	% peso
condutor	30,9	146,5	4,6	182,0	48,4
não-condutor	19,3	0,3	0,1	19,7	5,2
Intermediário	149,1	20,3	5,1	174,5	46,4

Tabela 16 – Resultados das amostras do cordão paralelo com abertura de 6mm
na separação eletrostática

fração	PVC (%)	cobre (%)	PVC+cobre (%)	massa (%)	% peso
condutor	44,2	155,5	3,1	202,8	56,8
não-condutor	25,4	0,3	0,0	25,7	7,2
intermediário	117,1	10,4	0,9	128,4	36,0

Tabela 17 – Resultados das amostras do cordão paralelo com abertura de 3mm
na separação eletrostática

fração	PVC (%)	cobre (%)	PVC + cobre (%)	massa (%)	% peso
condutor	14,5	153,2	0,0	167,7	44,1
não-condutor	116,5	1,5	0,0	118,0	31,0
intermediário	85,3	9,3	0,0	94,6	24,9

Na tabela 15, observou-se que além da amostra não estar liberada, a quantidade de material intermediário chega a ser 46% do valor da amostra total. Na tabela 16 a quantidade de material misto continua elevada, ou seja 36%, indicando que a amostra não estava com o cobre e o PVC liberados. E na tabela 17 constatou-se que houve uma diminuição na quantidade de material intermediário quando comparado com as outras granulometrias de 9mm e 6mm, sendo de 24,9%.

Nas tabelas 18, 19 e 20 encontram-se os resultados dos ensaios de separação eletrostática para o cabo tipo flexível em cada uma das classificações.

Tabela 18 – Resultados das amostras do cabo flexível com abertura de 9mm na separação eletrostática

fração	PVC (%)	cobre (%)	PVC + cobre (%)	massa (%)	% peso
condutor	35,7	117,5	49,6	202,8	59,6
não-condutor	20,4	0,3	0,2	20,9	6,1
intermediário	104,6	7,1	4,7	116,4	34,2

Tabela 19 – Resultados das amostras do cabo flexível com abertura de 6mm na separação eletrostática

fração	PVC (%)	cobre (%)	PVC + cobre (%)	massa (%)	% peso
condutor	45,6	143,9	23,8	213,3	56,3
não-condutor	26,1	0,5	0,1	26,7	7,0
intermediário	127,6	8,0	3,3	138,9	36,7

Tabela 20 – Resultados das amostras do cabo flexível com abertura de 3mm na separação eletrostática

fração	PVC (%)	cobre (%)	PVC + cobre (%)	massa (%)	% peso
condutor	21,5	146,5	0,3	168,3	45,7
não-condutor	92,7	1,8	0,0	94,5	25,7
intermediário	91,8	13,4	0,0	105,2	28,6

Na tabela 18 observou-se que o intermediário apresenta 91,8% de PVC, o fato do intermediário apresentar valores maiores de PVC ocorre em algumas tabelas de separação manual de separação eletrostática para os dois tipos de cabos. A separação eletrostática não foi um bom método para se separar o cobre do PVC dos fios e cabos elétricos porque o cobre e o PVC continuam

contaminados e o intermediário apresenta-se com quantidades maiores de PVC.

5.5. Atrição

Nas tabelas 21 a 24 mostram-se os valores dos ensaios realizados com o método de atrição para os cabos do tipo cordão paralelo e cabo flexível para os três tipos de granulometrias.

Tabela 21 – Valores dos ensaios de atrição no CP – afundado

ensaio	massa afundado (%)	% Cu afundado	% PVC afundado	% PVC + Cu
CP9A	48,7	90,7	7,5	1,9
CP6A	45,0	97,5	2,2	0,4
CP3A	44,0	98,6	1,4	0,0

Tabela 22 – Valores dos ensaios de atrição no CP – flutuado

ensaio	massa flutuado (%)	% PVC flutuado	% Cu flutuado	% PVC + Cu
CP9A	51,3	98,0	0,0	2,0
CP6A	55,0	98,8	0,3	0,9
CP3A	56,0	99,8	0,2	0,0

Tabela 23 – Valores dos ensaios de atrição no CF – afundado

ensaio	massa afundado (%)	% Cu afundado	% PVC afundado	% PVC + Cu
CF9A	49,1	81,4	5,1	13,5
CF6A	46,4	88,1	3,5	8,3
CF3A	46,0	98,2	1,8	0,0

Tabela 24 – Valores dos ensaios de atrição no CF – flutuado

ensaio	massa flutuado (%)	% PVC flutuado	% Cu flutuado	% PVC + Cu
CF9A	50,9	97,6	0,0	2,4
CF6A	53,6	98,6	0,0	1,4
CF3A	54,0	99,5	0,5	0,0

Nos dois tipos de cabos os ensaios tiveram praticamente o mesmo comportamento com relação às granulometrias de 9, 6 e 3mm. Observou-se que nos ensaios com granulometria de 9mm o material é muito grosseiro e não está disperso, não sendo possível “atricionar”, formando um agregado de fios de cobre, semelhante a um novelo de lã, que manteve o polímero retido. Nos ensaios com granulometria de 6mm foi possível manter uma atrição nas partículas liberadas, o material, todavia, continuou grosso e pouco disperso formando neste caso um agregado na parte lateral do vaso. Com a granulometria de 3mm, o material ficou totalmente liberado, com isso interpretou-se que no caso dos cabos elétricos a atrição não é um método eficaz para granulometrias superiores a 3mm.

5.6. Bateamento

Nas tabelas 25 a 28 apresentam-se os resultados da separação manual dos ensaios de bateamento para o cabo tipo cordão paralelo e cabo flexível.

Tabela 25 – Valores dos ensaios de bateamento no CP – afundado

ensaio	massa afundado (%)	% Cu afundado	% PVC afundado	% PVC + Cu
CP9B	46,2	95,1	1,6	3,3
CP6B	42,7	98,1	1,9	0,0
CP3B	43,1	100,0	0,0	0,0

Tabela 26 – Valores dos ensaios de bateamento no CP – flutuado

ensaio	massa flutuado (%)	% PVC flutuado	% Cu flutuado	% PVC + Cu
CP9B	53,8	98,8	0,0	1,2
CP6B	57,3	99,9	0,0	0,7
CP3B	56,9	99,1	0,9	0,0

Tabela 27 – Valores dos ensaios de bateamento no CF – afundado

ensaio	massa afundado (%)	% Cu afundado	% PVC afundado	% PVC + Cu
CF9B	54,0	67,2	3,3	29,5
CF6B	45,2	89,4	2,3	8,3
CF3B	46,2	98,1	1,9	0,0

Tabela 28 – Valores dos ensaios de bateamento no CF – flutuado

ensaio	massa flutuado (%)	% PVC flutuado	% Cu flutuado	% PVC + Cu
CF9B	46,0	94,3	0,0	5,7
CF6B	54,8	95,7	0,0	4,3
CF3B	53,8	100,0	0,0	0,0

Os cabos do tipo cordão paralelo e cabo flexível apresentaram à granulometria de 3mm bons resultados de bateamento, a liberação do PVC e

do cobre é de 100% nos ensaios. O bateamento se mostrou um bom método, das 4 amostras resultantes com granulometria de 3mm, todas encontravam-se liberadas e a contaminação nas tabelas 25 e 28 foram inexistentes.

5.7. Elutriação

Nas tabelas 29 a 32 apresentam-se os resultados da separação manual dos ensaios de elutriação para os dois tipos de cabos com os três tipos de grelhas diferentes.

Tabela 29 – Valores dos ensaios de elutriação no CP – afundado

ensaio	massa afundado (%)	% Cu afundado	% PVC afundado	% PVC + Cu
CP9E	45,6	97,1	0,9	2,1
CP6E	47,7	98,8	0,4	0,8
CP3E	46,0	99,9	0,1	0,0

Tabela 30 – Valores dos ensaios de elutriação no CP – flutuado

ensaio	Massa flutuado (%)	% PVC flutuado	% Cu flutuado	% PVC + Cu
CP9E	54,4	95,3	2,9	1,8
CP6E	52,3	97,3	1,4	1,3
CP3E	54,0	100,0	0,0	0,0

Tabela 31 – Valores dos ensaios de elutriação no CF – afundado

Ensaio	massa afundado (%)	% Cu afundado	% PVC afundado	% PVC + Cu
CF9E	45,4	70,4	3,8	25,8
CF6E	42,4	88,8	1,1	10,1
CF3E	43,6	99,9	0,1	0,0

Tabela 32 – Valores dos ensaios de elutriação no CF – flutuado

ensaio	massa flutuado (%)	% PVC flutuado	% Cu flutuado	% PVC + Cu
CF9E	54,6	92,0	4,4	3,5
CF6E	57,6	90,9	4,8	4,4
CF3E	56,4	97,1	2,9	0,0

Os ensaios com a granulometria de 3mm no elutriador apresentaram bons resultados, as amostras no cordão paralelo apresentaram-se 100% liberadas e apenas o cabo flexível com granulometria de 3mm (flutuado) apresentou contaminação de 2,9%. Os ensaios com cabos do tipo cordão paralelo apresentaram-se menos contaminados que os ensaios com cabos do tipo flexível, a granulometria de 9mm foi a que apresentou mais contaminação entre os dois tipos de cabos.

5.8. Ensaio com cabos de alumínio

Nas tabelas 33 e 34 apresentam-se os valores do ensaio de separação em meio denso com cloreto de cálcio seguido de separação em meio denso com bromofórmio para a mistura dos cabos de alumínio com os cabos de cobre.

Tabela 33 – Resultados dos ensaios de separação em meio denso seguido de separação com cloreto de cálcio – flutuado

ensaio	massa flutuado (%)	% PVC flutuado	% PE flutuado
polietileno	16,3	0,0	100,0
PVC	21,0	100,0	0,0

Tabela 34 – Resultados dos ensaios de separação em meio denso seguido de separação com bromofórmio – afundado

ensaio	massa afundado (%)	% Cu afundado	% Al afundado
cobre	23,2	100,0	0,0
alumínio	32,6	0,0	100,0

Observou-se que os ensaios realizados com separação em meio denso utilizando o cloreto de cálcio, não obtiveram nenhum tipo de contaminação dos dois polímeros flutuados. Com os metais cobre e alumínio a utilização do bromofórmio separou os dois metais com 0% de contaminação.

6. COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS

Observou-se que com a granulometria de 3mm os dois tipos de cabos elétricos foram 100% liberados, nas outras granulometrias por não haver liberação, o material flutuado estava presente no material afundado e vice-versa. Em alguns ensaios com os métodos de separação observou-se que a contaminação cruzada entre amostras ocorria por arraste mecânico entre as partículas. Como mostra a figura 24, os métodos que tiveram melhor eficiência de separação com granulometria de 3mm foram em ordem crescente no sentido de melhor separação e menor contaminação:

Figura 24 – Fluxograma da eficiência de separação entre os métodos

Entre os métodos de bateamento, elutriação e separação em meio denso, este último é o único que apresenta 0% de contaminação no material

flutuado, ou seja, para o processo de separação não apresentar contaminação seria necessário apenas descontaminar o afundado repetindo o procedimento da separação. Na figura 25 tem-se um esquema de separação em meio denso utilizando a solução aquosa de cloreto de cálcio.

Figura 25 – Esquema de separação em meio denso

7. ESTIMATIVA DE CUSTO

Neste capítulo será apresentado uma estimativa de custo do processo, sendo restrito ao custo operacional de reagentes e energia da reciclagem de fios e cabos elétricos, sem considerar outros custos devido ao trabalho ser realizado em escala laboratorial. A tabela 35 apresenta a estimativa do custo de energia para processar 1t de sucatas de fios e cabos elétricos.

Tabela 35 – Estimativa de custo energético do moinho de facas utilizado na reciclagem de fios e cabos elétricos

cominuição – moinho de facas RONE				TOTAL
potência	capacidade processamento	R\$/hora	Tempo (h)/tonelada	total (R\$)/tonelada
5HP	20kg/hora	1,09	50	54,5

* 1 kwh = R\$ 0,29 – Eletropaulo (março/2006)

A tabela 36 apresenta o custo do cloreto de cálcio usado como líquido intermediário na separação em meio denso.

Tabela 36 – Estimativa de custo do cloreto de cálcio usado na separação em meio denso

			TOTAL
	litros / 5kg	R\$/litro	total (R\$)
cloreto de cálcio	200	7,76	1.552,00

* Synth (março/2006)

Levando em consideração que de uma tonelada de sucata de fios e cabos elétricos, possamos recuperar através de processamento mecânico e separação em meio denso cerca de 100% de cobre e levando em conta o custo da energia gasta, cerca de R\$ 54,50, temos que, para obter uma tonelada de cobre a partir de sucata eletrônica teríamos um custo de cerca de R\$ 1.606,5. O custo da tonelada de cobre no mercado está em torno de R\$ 8.220,00 pela cotação atual [59].

8. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi possível obter conclusões a respeito da reciclagem de fios e cabos elétricos:

1. Com cabos de cobre, só ocorre liberação para a granulometria de 3mm e para os cabos de alumínio a 6mm.
2. A separação granulométrica não foi viável para se fazer uma seleção das amostras devido ao grau de contaminação das mesmas.
3. A separação em meio denso é o método que obteve bons resultados, as amostras de cordão paralelo tiveram melhores resultados que as amostras de cabo flexível na granulometria de 3mm.
4. A separação eletrostática não foi um bom método para se separar os materiais de fios e cabos elétricos.
5. A atrição não foi um bom método, nos ensaios o material só foi “atricionado” na granulometria de 3mm, nas outras duas granulometrias formava-se um agregado de fios de cobre.
6. O bateamento se mostrou um bom método para ser adotado, os contaminantes nas amostras não ultrapassaram 1,9% nos ensaios com granulometria de 3mm.

7. Os ensaios de 3mm com o elutriador apresentaram bons resultados na pesquisa, todas as amostras praticamente foram 100% separadas e sem contaminação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ABINEE. Panorama econômico. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br>>. Acesso em: 25 de Novembro de 2005.

[2] IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Disponível em: <<http://www.ipt.br/inovacao/exemplos/plastico/definição>>. Acesso em: 25 de Fevereiro de 2003.

[3] EHRIG, R. J. *Plastics Recycling – Products and Processes*, Hanser Publishers, EUA, p. 51-53, 1992.

[4] URBAN, A. Mundo virtual: Lixo tecnológico, um problema mundial. Disponível em: <<http://www.an.com.br>>. Acesso em: 11 de Nov. 2004.

[5] EPA - United States Environmental Protection Agency. Electronics: A new opportunity for waste prevention, reuse, and recycling, p. 1-4, June. 2001.

[6] REALFF, M. J.; RAYMOND, M.; AMMONS, J. C. E- waste: an opportunity. *Materialstoday*, USA, p. 40-45, Jan. 2004.

[7] PUCKET, J.; SMITH, T. Exporting harm. The high-tech trashing of Asia. The Basel Action Network (BAN) & Silicon Valley Toxics Coalition (SVTC). Disponível em: <<http://www.svtc.org>>. Acesso em: 11 de Nov. 2004.

[8] LEE, C.; CHANG, S.; WANG, K. Management of scrap computer recycling in Taiwan. *Journal of hazardous materials*, v. 73, p. 209-220, Apr. 1999.

[9] OGILVIE, S. Recovery of waste from electric & electronic equipment: Economic & environmental impacts. Report N° AEAT / 2004. Didcot, Oxfordshire, UK: European Commission / AEA Technology. 1997.

[10] MENETTI, R. P.; TENÓRIO, J. A. S.; CHAVES, A. P. Production of non-ferrous metallic concentrates from electronic scrap. In: TMS ANNUAL MEETING-PROCEEDINGS OF THE EPD CONGRESS, Orlando: TMS, n. 125, p. 505-509, 1997.

[11] MENETTI, R. P.; TENÓRIO, J. A. S. Reciclagem de metais preciosos a partir de sucata eletrônica. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, São Pedro: ABM, n. 50, p. 625-634, 1995.

[12] RILEY, W. D.; DAELLENBACH, C. Recycling of electronic scrap. Washington, D.C.: U.S. Bureau of Mines, p. 1228-1232, 1991.

[13] Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE) – Desempenho Setorial. Disponível na Internet no endereço <http://www.abinee.org.br/abinee/decon/decon15.htm>. Acesso em: 11 de Set. 2004.

[14] SUM, E. Y. L. The recovery of metals from electronic scrap. JOM, p. 53-61, Abr. 1991.

[15] HOFFMANN, J.E. Recovering precious metals from electronic scrap. JOM, n. 44, p. 43-48, Jul. 1992.

[16] TENORIO, J.A.S., MENETTI, R.P., CHAVES, A. P. Production of non-ferrous metallic concentrates from electronic scrap. In: Minerals, Metals and Materials Society/AIME (USA), p. 505-509, 1997.

[17] TOMASEK, K.; VADASZ, P.; RABATIN, L. Gold extraction from the electronical scrap. Acta Metallurgica Slovaca (Slovak Republic), v. 6, n. 2, p. 116-124, 2000.

[18] UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Obsolete Computers, "Gold Mine", or High – Tech Trash?. Resource Recovery from Recycling. JOM. Aug. 2004.

[19] WANG, H. P.; CHIEN, Y. Fate of bromite in pyrolysis of printed circuit board wastes. Chemosphere, v. 40, p. 383-387, 2000.

[20] WEI, M. S.; HUANG, K. H. Recycling and reuse of industrial wastes in Taiwan. Waste management. p. 93-97, 2001.

[21] TENORIO, J.A.S., ESPINOSA, D.C.R. Capítulo 5: Controle Ambiental de Resíduos. In: PHILIPPI Jr, A., ROMÉRO, M.A., BRUNA, G.C. Curso de Gestão Ambiental. 1ª ed. Editora Manole Ltda, p. 155-211, 2004.

[22] FONTOURA, C. Bateria usada vira problema para donos de celular. O Estado de São Paulo, 24 de agosto de 1998.

[23] REZENDE, P. R. Cabo de média potência. São Paulo: Pirelli, p. 38. 2004. (Relatório Técnico).

[24] SUBRAMANIAN, P. M. Plastics recycling and waste management in the US. Resources, conservation and recycling, v. 28, p. 253-263, 2000.

[25] NETO, M. B. A reciclagem de fios e cabos de PVC. São Paulo: Instituto do PVC, n. 18, Set. 2002. (Artigo Técnico).

[26] ZHANG, S.; FORSSBERG, E. Intelligent liberation and classification of electronic scrap. Powder technology, v. 105, p. 295-301, Nov. 1999.

[27] FORSSBERG, E.; ZHANG, S. L. Mechanical separation-oriented characterization of electronic scrap. Resources, conservation and recycling, v. 21, p. 247-269, 1997.

[28] DALMIJN, W. L. Practical applications of eddy currents in the scrap recycling. In: Proc. Second Int. Symposium recycling of metals and engineering materials, the minerals, Metals and Materials Society. 1990.

[29] REM, P. C. A model for eddy current separation. International journal of mineral processing, v. 49, p. 193-200, 1997.

[30] RILEY, W. D.; DAELLENBACH, C.B.; GABLER, R.C. Recycling of electronic scrap. ASM International, USA, ed.3, v. 2, p. 1228-1232, 1990.

[31] SPENCER, D. B. The high-speed identification and sorting of nonferrous scrap. JOM. v. 57, n. 4, April. 2005.

[32] SOLVAY. Disponível em: <<http://www.solvayindupa.com.br/pvc/pvc.htm>>. Acesso em: 2 de Dezembro de 2005.

[33] ANON. Curso básico intensivo de plásticos. Jornal de plásticos, Niterói, 1997.

[34] WIEBECK, H.; RODRIGUES, A. A. O uso de agalmatolito em composto de PVC para utilização em coberturas de fios e cabos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERAMICA, João Pessoa: Congresso Brasileiro de cerâmica, n. 47, p. 694-698, 2003.

[35] ORMANJI, W. et al. Tecnologia do PVC. São Paulo: ProEditores / Braskem, p. 9-11, 2002.

[36] PLASTICS ADDITIVES & COMPOUNDING. Wire and cable: some new developments, EUA, p. 32-36, May. 2004.

[37] BREDU, M.; VASILE, C. Study of the natural ageing of PVC insulation for electrical cables. Polymer degradation and stability, v. 67, p. 209-221, May. 1999.

[38] APME Association of Plastics Manufacturers in Europe. An examination of waste treatment scenarios for plastics from end-for-life electrical and electronic equipment using an eco-efficiency model. Disponível em: <<http://www.apme.org>>. Acesso em: 30 de Novembro de 2000.

[39] MENAD, N.; BJORKMAN, BO.; ALLAIN, E. G.; Combustion of plastics contained in electric and electronic scrap. Resources, conservation and recycling, v. 24, p. 65-85, Oct. 1998.

[40] SCHWARZ, L. B. Reciclagem: Vida longa para plásticos, polímeros – ciência e tecnologia, Dez. 1995.

[41] WIEBECK, H. YOSHIGA, A. Reaproveitamento de resíduo de PVC. Revista gerenciamento ambiental. v. 5, n.25, p. 43-45, 2003.

[42] SAEKI, y. Challenges of waste towards the 21 th century, international polymer process XIII, 1993.

[43] SOUZA, W. Setor recicla preconceitos, plástico moderno, May. 1993.

[44] WIEBECK, H. Instituto do PVC. CD ROM: Reciclagem mecânica do PVC: Uma oportunidade de negócio. 2002.

[45] GORNI, A. A. Introdução aos plásticos. Revista plástico industrial. 2000.

[46] CEBRACO. Cobre e suas ligas, Curso de metalurgia e metalografia, São Paulo, v. 2, n. 20, 1967.

[47] ISRI Institute of Scrap Recycling Industries, Inc. Disponível em: <<http://www.isri.org>>. Acesso em: 1 de Dezembro de 2005.

[48] BARNES, C. C. Electric cables. London: SIR PITMAN & SONS LTD, p. 1-6, 1980.

[49] U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Mineral Commodity Summaries. Disponível em: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/copper/>. Acesso em: 21 de Fevereiro de 2005.

[50] ASTM. Standard Test Method for Sieve Analysis of Metal Powders. Designation B 214 – 99.

[51] WILLS, B. A. Heavy medium separation. In: Mineral Processing Technology. New York: Pergamon Press, 4 ed., n. 11, p. 420 – 456, 1988.

[52] LUZ, A. B. SAMPAIO, J. A. ALMEIDA, S. L. Tratamento de minérios. CETEM – MCT. ed. 4. Rio de Janeiro ,2004.

[53] CUI, J., FORSSBERG, E. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review. *Journal of Hazardous Materials* B99, p. 243 – 263, 2003.

[54] RON, A.; PENEV, K. Disassembly and recycling of electronic consumer products: an overview. *Technovation*. v. 15, n. 6, p. 363-374, 1995.

[55] INBRAZ Equipamentos magnéticos e vibratórios Ltda. Separador eletrostático, Catálogo Nº. INB-130A. p. 7-9, 2005.

[56] TAGGART, A. F. **Handbook of mineral dressing**. New York, USA: John Wiley & Sons, v.1, p. 10-16, 1945.

[57] ENGENDRAR ENGENHEIROS ASSOCIADOS LTDA. Fabricação de equipamentos para tratamento e beneficiamento de minérios. Disponível em: <[http:// www.engendrar.com.br](http://www.engendrar.com.br) >. Acesso em: 28 de Novembro de 2005.

[58] HEGBERG, A. B. Mixed plastics recycling technology, U.S.A, p. 147, 1992.

[59] Caderno do Cobre – Met@lica Jornal. Disponível em:< <http://www.metalica.com.br>>. Acesso em: 13 de Dezembro de 2005.

[60] SERVIÇOS DE BIBLIOTECAS – EP / USP. Diretrizes para apresentação de dissertações e teses. 2. ed. São Paulo: USP, p. 39, 2001.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Faturamento das indústrias eletro-eletrônicas de 1994 a 2001.....	6
Figura 2 -	Cabo flexível.....	21
Figura 3 -	Cordão paralelo.....	21
Figura 4 -	Cabo de alumínio.....	22
Figura 5 -	Fluxograma simplificado dos ensaios para o tratamento de cabos elétricos.....	23
Figura 6 -	Moinho de facas utilizado para cominuir os cabos elétricos.....	24
Figura 7 -	Início da pilha alongada.....	25
Figura 8 -	Separador eletrostático Carpcó.....	30
Figura 9 -	Detalhe do separador eletrostático Carpcó.....	31
Figura 10 -	Esquema da máquina de atrição.....	32
Figura 11 -	Concentração gravitacional por meio de bateamento manual.....	34
Figura 12 -	Início do ensaio de elutriação.....	35
Figura 13 -	O PVC subindo e o cobre afundando.....	36
Figura 14 -	Cobre sedimentado no fundo do elutriador.....	36
Figura 15 -	Aspecto do material obtido após a moagem do cabo tipo flexível em moinho de facas com grelha de abertura de 9mm.....	40
Figura 16 -	Aspecto do material obtido após a moagem do cabo tipo flexível em moinho de facas com grelha de abertura de 6mm.....	40
Figura 17 -	Aspecto do material obtido após a moagem do cabo tipo flexível em moinho de facas com grelha de abertura de 3mm.....	41
Figura 18 -	Separação granulométrica com o cabo tipo cordão paralelo com grelha de abertura de 9mm.....	42
Figura 19 -	Separação granulométrica com o cabo tipo cordão paralelo com grelha de abertura de 6mm.....	43
Figura 20 -	Separação granulométrica com o cabo tipo cordão paralelo com grelha de abertura de 3mm.....	44
Figura 21 -	Separação granulométrica com o cabo tipo flexível com grelha de	

	abertura de 9mm.....	45
Figura 22 -	Separação granulométrica com o cabo tipo flexível com grelha de abertura de 6mm.....	46
Figura 23 -	Separação granulométrica com o cabo tipo flexível com grelha de abertura de 3mm.....	47
Figura 24 -	Fluxograma da eficiência de separação entre os métodos.....	59
Figura 25 -	Esquema de separação em meio denso.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Metais, plásticos e óxidos presentes em diferentes lotes de resíduos eletro-eletrônicos.....	5
Tabela 2 -	Crescimento dos plásticos no resíduo sólido municipal.....	16
Tabela 3 -	Resultado da quantidade de metal e polímero presente nos dois tipos de cabos.....	39
Tabela 4 -	Resultado da quantidade de metal e polímero presente no cabo de alumínio.....	39
Tabela 5 -	Resultados da separação manual da separação granulométrica com CP – 9mm.....	41
Tabela 6 -	Resultados da separação manual da separação granulométrica com CP – 6mm.....	42
Tabela 7 -	Resultados da separação manual da separação granulométrica com CP – 3mm.....	44
Tabela 8 -	Resultados da separação manual da separação granulométrica com CF – 9mm.....	45
Tabela 9 -	Resultados da separação manual da separação granulométrica com CF – 6mm.....	46
Tabela 10 -	Resultados da separação manual da separação granulométrica com CF – 3mm.....	47
Tabela 11 -	Valores da separação em meio denso no CP – afundado.....	48
Tabela 12 -	Valores da separação em meio denso no CP – flutuado.....	48
Tabela 13 -	Valores da separação em meio denso no CF – afundado.....	49
Tabela 14 -	Valores da separação em meio denso no CF – flutuado.....	49
Tabela 15 -	Resultados das amostras do cordão paralelo com abertura de 9mm na separação eletrostática.....	50
Tabela 16 -	Resultados das amostras do cordão paralelo com abertura de 6mm na separação eletrostática.....	51
Tabela 17 -	Resultados das amostras do cordão paralelo com abertura de 3mm na	

	separação eletrostática.....	51
Tabela 18 -	Resultados das amostras do cabo flexível com abertura de 9mm na separação eletrostática.....	52
Tabela 19 -	Resultados das amostras do cabo flexível com abertura de 6mm na separação eletrostática.....	52
Tabela 20 -	Resultados das amostras do cabo flexível com abertura de 3mm na separação eletrostática.....	52
Tabela 21 -	Valores dos ensaios de atrição no CP – afundado.....	54
Tabela 22 -	Valores dos ensaios de atrição no CP – flutuado.....	54
Tabela 23 -	Valores dos ensaios de atrição no CF – afundado.....	54
Tabela 24 -	Valores dos ensaios de atrição no CF – flutuado.....	54
Tabela 25 -	Valores dos ensaios de bateamento no CP – afundado.....	55
Tabela 26 -	Valores dos ensaios de bateamento no CP – flutuado.....	55
Tabela 27 -	Valores dos ensaios de bateamento no CF – afundado.....	55
Tabela 28 -	Valores dos ensaios de bateamento no CF – flutuado.....	55
Tabela 29 -	Valores dos ensaios de elutriação no CP – afundado.....	56
Tabela 30 -	Valores dos ensaios de elutriação no CP – flutuado.....	56
Tabela 31 -	Valores dos ensaios de elutriação no CF – afundado.....	57
Tabela 32 -	Valores dos ensaios de elutriação no CF – flutuado.....	57
Tabela 33 -	Resultados dos ensaios de separação em meio denso seguido de separação com cloreto de cálcio – flutuado.....	58
Tabela 34 -	Resultados dos ensaios de separação em meio denso seguido de separação com bromofórmio – afundado.....	58
Tabela 35 -	Estimativa de custo energético do moinho de facas utilizado na reciclagem de fios e cabos elétricos.....	61
Tabela 36 -	Estimativa de custo do cloreto de cálcio usado na separação em meio denso.....	61