

Reciclagem de fios e cabos elétricos - cabo paralelo

(Recycling of parallel wires using unit operations
of mineral processing)

Mishene Christie Pinheiro Bezerra de Araújo

Mestre em Engenharia. PMT EPUSP. E-mail: mishene@hotmail.com

Arthur Pinto Chaves

Professor Titular, PMI EPUSP. E-mail: apchaves@usp.br

Denise Croce Romano Espinosa

Doutora em Engenharia. PMT EPUSP. E-mail: espinosa@usp.br

Jorge Alberto Soares Tenório

Professor Titular. PMT EPUSP. E-mail: jtenorio@usp.br

Resumo

O descarte de produtos eletro-eletrônicos vem crescendo anualmente. Por esse motivo, necessita-se de reciclagem para que se evite o desperdício de recursos naturais não-renováveis. O objetivo desse trabalho é estudar a reciclagem dos cabos tipo cordão paralelo através de operações unitárias de tratamento de minérios. As seguintes operações unitárias foram testadas: moagem, separação granulométrica, separação em meio denso, separação eletrostática, atrição, bateamento e elutrição. Ao final desses processos, observou-se que as operações utilizadas obtiveram concentrados de cobre com baixo grau de contaminação. Observou-se que todas as técnicas precisam de uma outra técnica para complementá-las. Concluiu-se, ainda, que a moagem em moinho de facas com grelha de 3mm é necessária para se conseguir a total liberação dos materiais.

Palavras-chave: Reciclagem, sucata eletrônica, cabos.

Abstract

The composition and discharge of eletro-electronic products is increasing year after year. To avoid the loss of non-renewable mineral resources and energy, the establishment of a recycling loop for such products is necessary. The goal of this work is to study the recycling of parallel wires using unit operations of mineral processing. The following unit operations were used: grinding, size separation, sink-and-float, electrostatic separation, scrubbing, panning and elutriation. One can observe a low contamination grade in the obtained copper. However, in all cases, a two step flow sheet must be used to completely separate plastics from copper. One can conclude that the total liberation of materials during grinding was reached when the final particle sizes were inferior to 3mm.

Keywords: Recycling, electronic scrap, wires.

1. Introdução

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

Portanto a coleta e a reciclagem de produtos eletro-eletrônicos é uma necessidade atual, em termos, não apenas de se conservarem 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 por esse tipo de produto.

Nos últimos 10 anos, tem se intensificado os estudos sobre reciclagem de sucata eletro-eletrônica (Cui & Forsberg, 2003; Lee et. al., 1999; Zhang & Forsberg, 1999), todavia muitos aspectos ainda precisam de ser desenvolvidos. Nesse contexto, esse trabalho apresenta uma efetiva contribuição sobre a reciclagem de fios e cabos, assumindo que, no desenvolvimento de processos de reciclagem, os fios e cabos, bem como as baterias, devem ser segregados. Aliás, grande parte dos equipamentos possui cordões de força ou de ligação telefônica separados do corpo do equipamento.

2. Objetivos

O objetivo desse trabalho é estudar a reciclagem dos cabos tipo cordão paralelo através de operações unitárias de tratamento de minérios.

3. Materiais e métodos

Determinação do grau de moagem para liberação

Foram separados 9kg de cabos dos tipos cordão paralelo, os quais foram processados em moinho de facas. A escolha do cordão paralelo se deveu ao fato de ser um dos mais utilizados no mercado, bem como os mais encontrados em eletrodomésticos.

Foram usadas três aberturas de grelhas diferentes, respectivamente, 9, 6 e 3mm. Foram processados 3kg para cada grelha.

Após a moagem, cada amostra foi dividida por quarteamento de pilha em duas partes. 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.

Separção granulométrica

Utilizou-se um agitador de peneiras redondas de aberturas de: 4,76, 2,83, 1,7, 1,0, e 0,5mm. As amostras foram de, aproximadamente, 100g cada e permaneceram no agitador por 15 min.

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.

Para facilitar a nomenclatura dos ensaios, utilizaram-se códigos que podem ser traduzidos como: CP (cordão paralelo), SG (separação granulométrica), MD (separação em meio denso), A (atrilção), B (bateamento) e E (elutriação). Por exemplo: CP3B, nesse caso seria traduzido como “ensaio de separação em bateia realizado com cabo paralelo moído com granulometria de 3mm”.

Meio denso

O meio denso utilizado foi a solução aquosa de cloreto de cálcio com densidade de 1,41g/cm³. Esse valor de densidade foi escolhido, porque as espécies a separar possuíam densidades 9,6g/cm³ (cobre) e 1,21g/cm³ (PVC). 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 de-

vido 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.

Separção eletrostática

Para os ensaios de separação eletrostática, foram separadas três amostras de, aproximadamente, 300g e as granulometrias foram de 9, 6 e 3mm.

A alimentação das amostras ao sistema foi feita de forma gradual, variando a abertura do divisor, de acordo com a granulometria do material. Ao final de cada ensaio, as amostras foram classificadas em: condutora, não-condutora e intermediária.

Atrilção

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

Bateamento

Os ensaios foram realizados com o auxílio de uma bacia plástica com água, colocando-se a amostra na bateia. Em seguida, imergiu-se a bateia pela metade na bacia e, vagarosamente, em movimentos circulares, foi se separando o PVC, que caía na bacia com água, sendo que o cobre permanecia na bateia.

Elutriação

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

4. Resultado e discussão

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, houve, praticamente, 100% de liberação do plástico do cobre.

Na Tabela 1, 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.

Verificou-se que, para a grelha de 9mm, obteve-se 2,5% de PVC agregado ao cobre. Isto significa que o material não foi totalmente liberado.

Na Tabela 2, apresentam-se os resultados dos ensaios feitos com o cabo tipo cordão paralelo na separação granulométrica com abertura de grelha de 6mm.

Observou-se que houve uma diminuição na quantidade de PVC e cobre agregados. Na faixa granulométrica -2,83 + 1,7mm, tem-se 36% da amostra, onde 32% é só de PVC. O cobre teve maior concentração nas granulometrias abaixo de 0,5mm. Verificou-se, também, que, nas faixas granulométricas -4 + 2,83 e -2,83 + 1,7mm, 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 3, têm-se as separações e diferenças de peso dos ensaios feitos na separação granulométrica com abertura de grelha de 3mm.

Com a moagem até 3mm, os materiais encontraram-se 100% liberados. O PVC continuou concentrado na faixa de -2,83 + 1,7mm juntamente com o cobre.

Separação em meio denso

As Tabelas 4 e 5 mostram os resultados da separação em meio denso com as três granulometrias.

Tabela 1 - Resultados da separação manual da separação granulométrica com CP - 9mm.

| Abert. (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 |

Tabela 2 - Resultados da separação manual da separação granulométrica com CP - 6mm.

| Abert. (mm) | % passante total | Cu (%) | PVC (%) | Cu + 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 |

Tabela 3 - Resultados da separação manual da separação granulométrica com CP - 3mm.

| Abert. (mm) | % passante total | Cu (%) | PVC (%) | Cu + PVC (%) | % peso total |
|-------------|------------------|--------|---------|--------------|--------------|
| +4 | 99,7 | 3,7 | 0,2 | 0,0 | 3,9 |
| -4 +2,8 | 95,8 | 2,2 | 0,4 | 0,0 | 2,6 |
| -2,8 +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 |

As tabelas mostram a contaminação cruzada, ou seja, de PVC no cobre e de cobre no PVC. Nota-se que, para as aberturas 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 partes flutuadas, não se observou contaminação de cobre nos ensaios. No caso da Tabela 4, tem-se 1,1% de contaminação do PVC na amostra de cobre.

Para se conseguir a separação completa dos materiais, o que se deve fazer é tratar-se novamente o material afundado para se conseguir o cobre mais purificado e recuperar-se ainda mais o PVC.

Separação eletrostática

Nas Tabelas 6 a 8, encontram-se os resultados de separação manual com ensaios de separação eletrostática.

Na Tabela 6, 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 7, 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 8, 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%.

Assim, a separação eletrostática, além de ser um método relativamente caro, no caso da separação de materiais do cordão paralelo não se mostrou eficiente.

Atrição

Os valores dos ensaios realizados com o método de atrição estão apresentados nas Tabelas 9 e 10.

Esperava-se, com a atrição, promover a separação nas granulometrias de 9 e 6mm, diminuindo-se o trabalho de moagem. Os ensaios tiveram, praticamente,

Tabela 4 - Valores da separação em meio denso no CP - afundado.

| Ensaio | Afundado (%) | % Cu | % PVC | % 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 5 - Valores da separação em meio denso no CP - flutuado.

| Ensaio | Flutuado (%) | % PVC | % Cu | % 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 |

Tabela 6 - Resultados das amostras do cordão paralelo com abertura de 9mm na separação eletrostática.

| Fração | PVC (g) | Cobre (g) | PVC+Cu(g) | % peso |
|---------------|---------|-----------|-----------|--------|
| Condutor | 30,9 | 146,5 | 4,6 | 48,4 |
| Não-condutor | 19,3 | 0,3 | 0,1 | 5,2 |
| Intermediário | 149,1 | 20,3 | 5,1 | 46,4 |

Tabela 7 - Resultados das amostras do cordão paralelo com abertura de 6mm na separação eletrostática.

| Fração | PVC (g) | Cobre(g) | PVC+Cu(g) | % peso |
|---------------|---------|----------|-----------|--------|
| Condutor | 44,2 | 155,5 | 3,1 | 56,8 |
| Não-condutor | 25,4 | 0,3 | 0,0 | 7,2 |
| Intermediário | 117,1 | 10,4 | 0,9 | 36,0 |

Tabela 8 - Resultados das amostras do cordão paralelo com abertura de 3mm na separação eletrostática.

| Fração | PVC (g) | cobre(g) | PVC+Cu(g) | % peso |
|---------------|---------|----------|-----------|--------|
| Condutor | 14,5 | 153,2 | 0,0 | 44,1 |
| Não-condutor | 116,5 | 1,5 | 0,0 | 31,0 |
| Intermediário | 85,3 | 9,3 | 0,0 | 24,9 |

o mesmo comportamento com relação às granulometrias de 9, 6 e 3mm, o que mostra que a atrição serve para liberar o material agregado, mesmo em granulometrias superiores a 3mm. Com a granulometria de 3mm, o material ficou totalmente liberado. Todavia, para todas as granulometrias, houve contaminação cruzada em níveis superiores aos encontrados com meio denso na granulometria de 3mm.

Bateamento

Nas Tabelas 11 e 12, apresentam-se os resultados da separação manual dos ensaios de bateamento.

Os cabos do tipo cordão paralelo apresentaram liberação do PVC e do cobre de 100%, nos ensaios com amostras de 3mm. O bateamento se mostrou um bom método.

O processo se mostrou mais seletivo com relação ao material afundado do que com o flutuado, ou seja, o oposto ao observado no tratamento em meio denso, assim, o uso das duas técnicas combinadas pode levar a melhores resultados do que as duas técnicas isoladas.

Elutriação

Os resultados da separação manual dos ensaios de elutriação estão apresentados nas Tabelas 13 e 14.

Os ensaios com a granulometria de 3mm e as amostras no cordão paralelo apresentaram-se 100% liberadas.

O processo de elutriação mostrou ser o melhor em comparação aos demais. Os níveis de contaminação cruzada foram os menores de todos os processos.

Comparação dos métodos

Observou-se que a contaminação cruzada entre amostras ocorria por arraste mecânico entre as partículas na granulometria de 3mm. Os métodos que tiveram melhor eficiência de separação, com granulometria de 3mm, no sentido de melhor separação e menor contami-

Tabela 9 - Valores dos ensaios de atrição no CP - afundado.

| Ensaio | Afundado (%) | % Cu | % PVC | % 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 10 - Valores dos ensaios de atrição no CP - flutuado.

| Ensaio | Flutuado (%) | % PVC | % Cu | % 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 11 - Valores dos ensaios de bateamento no CP - afundado.

| Ensaio | Afundado (%) | % Cu | % PVC | % 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 |

Tabela 12 - Valores dos ensaios de bateamento no CP - flutuado.

| Ensaio | Flutuado (%) | % PVC | % Cu | % PVC + Cu |
|--------|--------------|-------|------|------------|
| CP9B | 53,8 | 98,8 | 0,0 | 1,2 |
| CP6B | 57,3 | 99,9 | 0,0 | 0,1 |
| CP3B | 56,9 | 99,1 | 0,9 | 0,0 |

Tabela 13 - Valores dos ensaios de elutriação no CP - afundado.

| Ensaio | Afundado (%) | % Cu | % PVC | % 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 14 - Valores dos ensaios de elutriação no CP - flutuado.

| Ensaio | Flutuado (%) | % PVC | % Cu | % 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 |

nação, foram separação eletrostática, atrição, meio denso, bateamento e elutriação em ordem crescente de desempenho.

A Tabela 15 mostra um quadro-resumo dos processos estudados em termos de contaminação dos materiais obtidos.

De uma forma geral, a separação em meio denso, o bateamento e a elutriação são excelentes métodos para a separação. Assim, na seleção do processo, outros fatores podem e devem ser considerados, como velocidade de processamento e custo operacional.

5. Conclusões

Com cabos de cobre, só ocorre liberação quando se cominui até 3mm.

A separação eletrostática e a atrição não foram bons métodos para se separarem os materiais de fios e cabos elétricos.

A elutriação apresentou os melhores resultados com relação à seletividade, ou seja, com relação à seletividade ou pureza dos materiais finais.

Tabela 15 - Quadro comparativo mostrando o grau de pureza dos produtos obtidos pelas diferentes técnicas de beneficiamento para granulometria 100% inferior a 3mm.

| Processo | PVC | Cobre |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Separação Granulométrica | Ineficiente | Ineficiente |
| Meio Denso | Sem contaminação | 1% contaminado |
| Separação Eletrostática | Ineficiente | Ineficiente |
| Atrição | 0,2% contaminado | 1,5% contaminado |
| Bateamento | 0,1% contaminado | Sem contaminação |
| Elutriação | Sem contaminação | 0,1% contaminado |

6. Referências bibliográficas

- CUI, J., FORSSBERG, E. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review. *Journal of Hazardous Materials B99*, p. 243-263, 2003.
- LEE, C., CHANG, S., WANG, K. Management of scrap computer recycling in Taiwan. *Journal of Hazardous Materials*, v. 73, p. 209-220, 1999.
- ZHANG, S., FORSSBERG, E. Intelligent liberation and classification of electronic scrap. *Powder Technology*, v. 105, p. 295-301, 1999.

Artigo recebido em 17/07/2006 e aprovado em 23/06/2008.