

**UFRRJ**  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**DISSERTAÇÃO**

**Caracterização de Placas de Circuito Impresso Oriundas de Telefones  
Celulares e Recuperação de Cobre**

**Theo Antonio de Jesus**

**2015**





**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**CARACTERIZAÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO  
ORIUNDAS DE TELEFONES CELULARES E RECUPERAÇÃO DE  
COBRE**

**THEO ANTONIO DE JESUS**

Sob a Orientação do Professor  
**Dr. Rui de Góes Casqueira**

e Co-orientação da Professora  
**Dr<sup>a</sup>. Dilma Alves Costa**

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Química**, Área de Concentração em Tecnologia Química.

Seropédica, RJ  
Janeiro de 2015

660  
J58c  
T

Jesus, Theo Antonio de, 1974-  
Caracterização de placas de circuito  
impresso oriundas de telefones celulares e  
recuperação de cobre / Theo Antonio de Jesus.  
- 2015.  
110 f.: il.

Orientador: Rui de Góes Casqueira.  
Dissertação (mestrado) - Universidade  
Federal Rural do Rio de Janeiro, Curso de  
Pós-Graduação em Engenharia Química, 2015.  
Bibliografia: f. 89-99.

1. Engenharia química - Teses. 2.  
Resíduos de metal - Reaproveitamento -  
Teses. 3. Resíduos perigosos - Aspectos  
ambientais - Teses. 4. Circuitos impressos -  
Teses. 5. Cobre - Teses. 6. Telefone celular  
- Teses. I. Casqueira, Rui de Góes, 1971-  
II. Universidade Federal Rural do Rio de  
Janeiro. Curso de Pós-Graduação em  
Engenharia Química. III. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO**  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**THEO ANTONIO DE JESUS**

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Química**, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, área de Concentração em Tecnologia Química.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_

---

Rui de Góes Casqueira. Ph.D. UFRRJ.  
(Orientador)

---

Juacyara Carbonelli Campos. Ph.D. UFRJ

---

Leonardo Duarte Batista da Silva. Ph.D. UFRRJ

“A ciência nunca resolve um problema sem  
criar pelo menos outros dez”. (George  
Bernard Shaw)

## RESUMO

DE JESUS, Theo Antonio. **Caracterização de placas de circuito impresso oriundas de telefones celulares e recuperação de cobre.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química, Tecnologia Química). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2015.

O avanço tecnológico incentiva a troca constante dos equipamentos eletroeletrônicos aumentando a quantidade de resíduos gerados. A preocupação com a disposição desses resíduos está relacionada com a quantidade de metais existentes e sua disposição final, que geralmente se dá em lixões ou aterros. Estes resíduos apresentam metais preciosos e outros elementos traços que são liberados no meio ambiente pela lixiviação proveniente do ataque de ácidos orgânicos. A maior parte destes resíduos possui placas de circuito impresso onde está concentrada a maior parte dos metais, sendo que a caracterização destas placas ajuda na escolha dos processos de reciclagem mais adequados. Este trabalho teve como objetivo caracterizar as placas de circuito impresso de telefones celulares quanto sua periculosidade e composição, bem como investigar preliminarmente a possibilidade de recuperação de cobre via um processo eletrolítico e testar uma mistura de coagulante/floculante na remoção de metais, inclusive cobre. As placas foram processadas em moinho de facas, a fim de liberar os metais e, em seguida, foi feita a separação granulométrica em três frações de diferentes tamanhos. Cada uma das frações foi caracterizada por digestão em água régia, difração e fluorescência de raios X. A caracterização, quanto à periculosidade, foi realizada por meio do preconizado pela NBR ABNT 10005. Nas frações oriundas da granulometria foram realizadas as separações gravimétricas. Para a recuperação de cobre foi utilizada a técnica eletrolítica por meio de eletrólito preparado com a fração oriunda da gravimetria com maior concentração de metais. A eficiência da recuperação de cobre via processo eletrolítico foi avaliada por meio da diminuição de sua concentração no eletrólito em cinco tempos diferentes. Já a utilização da mistura coagulante/floculante teve sua eficiência avaliada pela verificação de qual proporção coagulante/floculante utilizada resultou em solução com menor concentração de metais. Fez-se também a comparação de recuperação de cobre por ambos os métodos. Os processos mecânicos utilizados foram adequados para promoverem a concentração da maioria dos metais alcançando cerca de 80 % na fração mais grosseira utilizando-se a separação granulométrica. Os resultados da caracterização mostraram que as placas de circuito impresso de celulares são ricas em cobre, alcançando valores médios de 40 %, além de apresentarem pequenas quantidades de ouro e prata. No estudo de periculosidade, foram encontrados níveis de chumbo em quantidades muito acima do limite estabelecido pela NBR ABNT 10004, sendo necessários tratamentos específicos no descarte deste tipo de resíduo. Algumas proporções de coagulante/floculante utilizadas produziram resultados mais satisfatórios que outras, ficando, na média, acima dos 90 % de remoção. A recuperação de cobre apresentou melhor desempenho utilizando processo eletrolítico, quando comparado ao obtido a qualquer proporção de coagulante/floculante utilizada, uma vez que alcançou 98,05 % após 40 minutos. Foi estimada a receita média gerada, na recuperação dos principais metais contidos nas placas de circuito impresso dos telefones celulares, descartados em 2013, no Brasil, chegando-se ao valor de US \$ 6.182.263,06.

**Palavras-chave:** resíduos eletrônicos, processamento mecânico, recuperação metálica.





## ABSTRACT

DE JESUS, Theo Antonio. **Circuit boards printed characterization coming from mobile phones and copper recovery**. Dissertation (Master Science in Chemical Engineering, Chemical Technology). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2015.

Technological advances encourages the constant exchange of electronic equipment by increasing the amount of waste generated. The concern with the disposal of these wastes is related to the amount of available metals and final disposal, which usually occurs in dumps or landfills. These wastes have precious metals and other trace elements that are released into the environment by leaching from the organic acid attack. Most of these residues has printed circuit boards in which are concentrated the most metals, and the characterization of these plates help to choose the most appropriate recycling processes. This study aimed to characterize the printed circuit boards of mobile phones as its danger and composition as well as preliminarily investigate the possibility of copper recovery via an electrolytic process and test a mixture of coagulant / flocculant in the removal of metals, including copper. The plates were ground knives in order to release the metals and then separating the particle size was made in three fractions of different sizes. Each of the fractions was characterized by digestion in aqua regia, diffraction and X-ray fluorescence characterization, as the danger was performed through recommended by the ABNT NBR 10005. In the fractions resulting from the grain size were performed gravity separations. For the recovery of copper was used in electrolytic technique medium prepared with the electrolyte coming from the gravimetric fraction with a higher concentration of metals. The copper recovery efficiency through electrolytic process was evaluated by the decrease of its concentration in the electrolyte at five different times. Also, the use of coagulant mixture / flocculant had their efficiency assessed by check which proportion coagulant / flocculant used resulted in solution with lower concentrations of metals. It is also made of copper recovery compared by both methods. Mechanical processes are used to promote adequate concentration of most metals with approximately 80% in the coarser fraction using the separation grain size. The characterization results showed that the printed circuit boards of mobile phones are rich in copper, mean values reaching 40%, in addition to having small amounts of gold and silver. In the study of danger, lead levels were found in amounts well above the limit established by ABNT NBR 10004, requiring specific treatments at the disposal of this type of waste. Some proportions coagulant / flocculant used produced better results than others, getting, on average, above 90% removal. The recovery of copper showed better performance using the electrolytic process, compared to that obtained at any ratio coagulant / flocculant used once reached 98.05 % after 40 minutes. It was estimated the average revenue generated in the recovery of metals from the main printed circuit boards of mobile phones discarded in 2013 in Brazil, reaching the amount of US \$ 6,182,263.06.

**Keywords:** electronic waste, mechanical processing, metal recovery.



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Tipos de PCI (adaptado de ABRACI; ANDRADE, 2002).....	31
<b>Figura 2:</b> Etapas do processo de reciclagem das PCI (Adaptado de Yazıcı and Deveci, 2009).....	33
<b>Figura 3:</b> Esquema de diagrama $E_h/pH$ (adaptado de JACKSON, 1986).....	36
<b>Figura 4:</b> Diagrama $E_h/pH$ do sistema cobre-água a 25°C (adaptado de JACKSON, 1986)..	37
<b>Figura 5:</b> Diagrama $E_h/pH$ do sistema cobre-água a 50°C (adaptado de JACKSON, 1986)..	38
<b>Figura 6:</b> Diagrama $E_h/pH$ do sistema cobre-água a 75°C (adaptado de JACKSON, 1986)..	38
<b>Figura 7:</b> Diagrama $E_h/pH$ do sistema ferro-água a 25 °C (adaptado de JACKSON, 1986)..	39
<b>Figura 8:</b> Elutriador (adaptado de MURUGAN et al., 2008).....	45
<b>Figura 9:</b> Diagrama esquemático de um separador de fluxo de ar em <i>zigzag</i> (adaptado de LONG et al., 2009).....	46
<b>Figura 10:</b> Separação de materiais por indução de condutividade (LUZ <i>et al.</i> , 2004).....	48
<b>Figura 11:</b> Placa de circuito impresso de telefone celular.....	51
<b>Figura 12:</b> Fluxograma das etapas do processo.....	52
<b>Figura 13:</b> Agitador rotativo.....	53
<b>Figura 14:</b> Moinho de facas.....	53
<b>Figura 15:</b> Separador granulométrico.....	54
<b>Figura 16:</b> Funil de separação.....	56
<b>Figura 17:</b> Agitador rotativo.....	58
<b>Figura 18:</b> Lixiviados oriundos separação da granulométrica.....	59
<b>Figura 19:</b> Filtrado, visto de cima, de uma das frações oriundas da separação granulométrica.....	59
<b>Figura 20:</b> Difrátômetro RIGAKU.....	60
<b>Figura 21:</b> Percentuais de massa que afundaram e flutuaram na separação gravimétrica.....	67
<b>Figura 22:</b> Percentuais dos materiais metálicos e não-metálicos das frações oriundas da separação granulométrica.....	69
<b>Figura 23:</b> Concentrações de cobre nas frações oriundas da separação granulométrica.....	70
<b>Figura 24:</b> Difrátograma fração F1 oriunda separação granulométrica.....	71
<b>Figura 25:</b> Difrátograma fração F2 oriunda separação granulométrica.....	72
<b>Figura 26:</b> Difrátograma fração F3 oriunda separação granulométrica.....	72
<b>Figura 27:</b> Percentuais de cobre nas frações oriundas da separação granulométrica caracterizadas por FRx.....	74
<b>Figura 28:</b> Percentuais de cobre nas frações oriundas da separação gravimétrica digeridas em água régia.....	77
<b>Figura 29:</b> Balanço de massa do processo para o cálculo da recuperação percentual de cobre.....	79
<b>Figura 30:</b> Concentração de cobre na célula eletrolítica variando com o tempo.....	80
<b>Figura 31:</b> Etapa final do processo eletrolítico.....	80
<b>Figura 32:</b> Estimativa da quantidade de PCI geradas em 2013 no Brasil.....	81
<b>Figura 33:</b> Estimativa da receita média gerada com cobre por meio do processamento de PCI.....	82



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Composição dos REE (Adaptado de WIDMER et al., 2005).....	<b>28</b>
<b>Tabela 2:</b> Composição metálica, por peso, para diferentes REE (Adaptado de CUI; ZHANG, 2008).....	<b>28</b>
<b>Tabela 3:</b> Composição e valoração dos REE (adaptado de TUNCUK et al., 2012).....	<b>30</b>
<b>Tabela 4:</b> Composição e valor intrínseco de metais nas PCI (adaptado de GOOSEY; KELLNER, 2002b).....	<b>30</b>
<b>Tabela 5:</b> Métodos de separação baseados nas propriedades físicas (adaptado de ZHANG S.; FORSSBERG, 1998; CUI; FORSSBERG, 2003).....	<b>34</b>
<b>Tabela 6:</b> Densidade de vários materiais presentes nas PCI (adaptado de SPEIGHT, 2005)..	<b>56</b>
<b>Tabela 7:</b> Misturas utilizadas de coagulante e floculante.....	<b>61</b>
<b>Tabela 8:</b> Massas obtidas pelos processos de dismantelamento e moagem das PCI.....	<b>65</b>
<b>Tabela 9:</b> Massa das frações obtidas através da separação granulométrica.....	<b>65</b>
<b>Tabela 10:</b> Massas obtidas pela separação gravimétrica.....	<b>66</b>
<b>Tabela 11:</b> Concentração (mg/L) nos lixiviados oriundos da separação granulométrica.....	<b>67</b>
<b>Tabela 12:</b> Concentração (mg/L) nos lixiviados das frações leves oriundas da separação gravimétrica.....	<b>68</b>
<b>Tabela 13:</b> Percentuais de materiais metálico e não-metálico.....	<b>69</b>
<b>Tabela 14:</b> Concentração dos metais presentes nas frações oriundas da separação granulométrica.....	<b>70</b>
<b>Tabela 15:</b> Concentração (%) dos metais nas frações oriundas da separação granulométrica obtida por FRx.....	<b>74</b>
<b>Tabela 16:</b> Percentuais dos materiais metálico e não-metálico nas frações leves oriundas da gravimetria.....	<b>75</b>
<b>Tabela 17:</b> Concentração (%) dos metais presentes nas frações leves oriundas da gravimetria.....	<b>75</b>
<b>Tabela 18:</b> Percentuais de materiais metálico e não-metálico das frações pesadas oriundas da gravimetria.....	<b>75</b>
<b>Tabela 19:</b> Concentração (%) dos metais presentes nas frações pesadas oriundas da gravimetria.....	<b>76</b>
<b>Tabela 20:</b> Concentrações inicial e residual (mg/L) na solução após a remoção dos metais pela mistura coagulante e floculante.....	<b>77</b>
<b>Tabela 21:</b> Percentuais de recuperação dos metais nas PCI no ensaio de <i>Jar test</i> .....	<b>78</b>
<b>Tabela 22:</b> Receita média gerada no processamento de PCI.....	<b>82</b>



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**PNUMA:** Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

**EEE:** Equipamentos Elétricos e Eletrônicos

**REE:** Resíduos eletroeletrônicos

**UE:** União Europeia

**PCI:** Placas de circuito impresso

**UFRRJ:** Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

**RoHS:** Restriction of Certain Hazardous Substances

**WEEE:** Waste Electrical and Electronic Equipment

**ANATEL:** Agência Nacional de Telecomunicações

**ICP-OES:** Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry

**ABNT:** Associação Brasileira de Normas Técnicas

**DRx:** Difração de raios X

**FRx:** Fluorescência de raios X

**FCC:** Fábrica Carioca de Catalisadores

**PEMM:** Programa de Engenharia Mecânica e de Materiais

**UFRJ:** Universidade Federal do Rio de Janeiro

**LABTEC:** Laboratório de Tecnologia

**DAU:** Departamento de Arquitetura e Urbanismo

**TBE:** Tetrabromoetano

**JCPDS:** Joint Committee on Powder Diffraction Standards





## LISTA DE SÍMBOLOS

**V<sub>i</sub>**: valor econômico de um metal qualquer i em diferentes tipos de resíduos  
**Pri**: preço, por tonelada, de um metal qualquer i  
**Pi**: peso percentual de um metal qualquer i na amostra de resíduos eletrônicos  
**Fe**: ferro  
**Cu**: cobre  
**Pb**: chumbo  
**Ni**: níquel  
**Ag**: prata  
**Au**: ouro  
**Pd**: paládio  
**US \$**: dólar americano  
**Hg**: mercúrio  
**Cd**: cádmio  
**mm**: milímetro  
**nm**: nanômetro  
**kg**: quilograma  
**t**: tonelada  
**g**: grama  
**ppm**: partes por milhão  
**£**: libra esterlina  
**M**: composição média  
**Sn**: estanho  
**Bi**: bismuto  
**Al**: alumínio  
**Zn**: zinco  
**FR**: Fire Retardant  
**pH**: potencial hidrogeniônico  
**E<sub>h</sub>**: potencial eletroquímico  
**O<sub>2</sub>**: gás oxigênio  
**H<sub>2</sub>**: gás hidrogênio  
**H<sup>+</sup>**: íon hidrogênio  
**e<sup>-</sup>**: elétron  
**H<sub>2</sub>O**: água  
**HO<sup>-</sup>**: íon hidroxíla  
**Cu<sup>2+</sup>**: íon cuproso  
**V**: volt  
**Fe<sup>2+</sup>**: íon ferroso  
**S**: enxofre  
**Fe<sup>3+</sup>**: íon férrico  
**L**: litro  
**°C**: grau Celsius  
**Ca**: cálcio  
**H**: campo magnético  
**J**: intensidade de magnetização proporcional ao campo  
**B**: intensidade de magnetização em um material sujeito a um determinado campo magnético  
**K**: susceptibilidade magnética  
**μ<sub>0</sub>**: permeabilidade magnética do vácuo  
**min**: minuto

**mL:** mililitro  
**Cl:** cloro  
**N:** nitrogênio  
**Na:** sódio  
**rpm:** rotações por minuto  
**h:** hora  
**kV:** quilovolt  
**d<sub>max</sub>:** diâmetro máximo  
**cv:** cavalo-vapor  
**d:** diâmetro  
**cm:** centímetro  
**ρ:** densidade  
**v:** volume  
**mV:** milivolts  
**P<sub>f</sub>:** perda física do processo de moagem  
**m<sub>m</sub>:** massa material moído  
**m<sub>a</sub>:** massa material desmantelado  
**μm:** micrometro  
**m<sub>r</sub>:** massa da amostra retida  
**m<sub>t</sub>:** massa total das três frações  
**m<sub>moa</sub>:** massa do material oriundo do processo de moagem  
**m<sub>fra</sub>:** massa total das três frações obtidas na separação granulométrica  
**Br:** bromo  
**Si:** silício

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	23
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	25
2.1 Objetivos Específicos .....	25
<b>3 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	27
3.1 Resíduos Eletroeletrônicos (REE) .....	27
3.2 Telefones Celulares .....	28
3.3 Placas de Circuito Impresso (PCI) .....	29
3.4 Legislação .....	32
3.5 Cobre .....	32
3.6 Métodos de Tratamento de Placas de Circuito Impresso (PCI) .....	33
3.6.1 Processos mecânicos .....	34
3.6.2 Pirometalurgia .....	34
3.6.3 Hidrometalurgia .....	35
3.6.4 Biohidrometalurgia .....	39
3.6.5 Eletrometalurgia .....	41
3.7 Processos Mecânicos .....	42
3.7.1 Cominuição .....	42
3.7.2 Separação granulométrica .....	44
3.7.3 Separação gravimétrica .....	44
3.7.4 Separação magnética .....	46
3.7.5 Separação eletrostática .....	48
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	51
4.1 Processamento Mecânico .....	52
4.1.1 Moagem .....	52
4.1.2 Separação granulométrica .....	54

4.1.3 Separação gravimétrica.....	55
4.2 Caracterização das Placas de Circuito Impresso Quanto à Periculosidade .....	57
4.2.1 Ensaios preliminares.....	57
4.2.2 Solução extratora .....	58
4.2.3 Obtenção do extrato lixiviado .....	58
4.3 Caracterização das Placas de Circuito Impresso Quanto à Composição.....	59
4.3.1 Digestão em água régia .....	59
4.3.2 Difração em raios X (DRx) .....	60
4.3.3 Fluorescência de raios X (FRx).....	60
4.4 Remoção de Metais por Precipitação .....	61
4.5 Recuperação Eletrolítica de Cobre das Placas de Circuito Impresso .....	62
4.5.1 Preparo do eletrólito .....	62
4.5.2 Recuperação eletrolítica do cobre.....	62
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>65</b>
5.1 Moagem.....	65
5.2 Separação Granulométrica.....	65
5.3 Separação Gravimétrica.....	66
5.4 Caracterização das Placas de Circuito Impresso Quanto à Periculosidade .....	67
5.5 Caracterização das Frações Oriundas da Separação Granulométrica Quanto à Composição .....	68
5.5.1 Lixiviação em água régia.....	68
5.5.2 Difração de raios X (DRx) .....	71
5.5.3 Fluorescência de raios X (FRx).....	73
5.6 Caracterização, Quanto à Composição, das Frações Leve e Pesada Oriundas da Separação Gravimétrica por Lixiviação em Água Régia .....	74
5.7 Remoção de Metais por Precipitação .....	77
5.8 Recuperação Eletrolítica de Cobre das Placas de Circuito Impresso .....	79
5.9 Valor Agregado dos Metais Presentes nas PCI.....	81

<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>85</b>
<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>87</b>
<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>89</b>
<b>ANEXO 1 – BOLETIM TÉCNICO IFloc 101 / IFloc 521 BT.....</b>	<b>101</b>
<b>ANEXO 2 – FICHAS DE IDENTIFICAÇÃO DAS ESPÉCIES.....</b>	<b>107</b>



## 1 INTRODUÇÃO

O número de habitantes no planeta ultrapassou a marca de sete bilhões de pessoas em 2011, e essa grande massa humana terá que sobreviver em um mundo onde a deterioração do meio ambiente é um fato incontestável e uma realidade dolorosa (NATIONS, 2013a).

Pouco mais da metade (52%) da população mundial vivia em áreas urbanas, em 2011, causando consideráveis impactos ao meio ambiente local, fazendo com que o gerenciamento dos resíduos sólidos seja um dos grandes desafios para os governantes e a maior preocupação para os ambientalistas (CHRISTIAN LUDWIG, 2003). Diferentes estratégias devem ser aplicadas para equacionar estes impactos, tais como a aplicação de tecnologias ambientais e o incremento de programas de reciclagem e reutilização (NATIONS, 2013b).

Ao alcançar o fim do seu ciclo de vida, o material usado perde valor econômico, tornando-se resíduo. De acordo com dados do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), cada pessoa no mundo gerou, em 2009, 1,59 toneladas de resíduo sólido (PNUMA, 2011). No Brasil cada pessoa gerou, também em 2009, 0,29 tonelada de resíduo sólido (UNITED NATIONS, 2013).

Em relação aos resíduos coletados no Brasil em 2012, tem-se que 58% seguiram para aterros sanitários, praticamente sem alteração do cenário registrado no ano anterior. O percentual restante corresponde a 76 mil toneladas diárias que são encaminhadas para lixões ou aterros controlados, os quais pouco se diferenciam dos lixões, uma vez que ambos não possuem o conjunto de sistemas e medidas necessários para proteção do meio ambiente contra danos e degradações. Quando isso acontece, além de poluir o meio ambiente, os componentes ou materiais que compõem esses resíduos estão deixando de se tornar reusáveis, recicláveis ou reaproveitáveis (ABRELPE, 2012).

O cenário atual é que novas fontes de energia e materiais estão cada vez mais escassas e difíceis de serem encontradas, assim como locais que possam ser usados para dispor resíduos a um baixo custo. Em consequência disto, a sociedade tem mostrado interesse cada vez maior por meios de reutilização, reciclagem e reaproveitamento de materiais (ABRELPE, 2012).

Inseridos nos resíduos sólidos estão os Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (EEE) que têm, em média, vida útil não muito longa, pois novos modelos mais modernos surgem a cada dia (GOOSEY, 2002). A produção e consumo de EEE têm crescido muito nas últimas décadas, ao ponto de transformar o setor de eletroeletrônicos em um dos mais importantes da indústria nacional, com receita total de R\$ 156,7 bilhões e força de trabalho de 178.000 colaboradores no ano de 2013 (ABINEE, 2014). Tudo isso tende a gerar uma quantidade imensa de materiais obsoletos interessantes do ponto de vista econômico e preocupantes do ponto de vista ambiental (KELLNER, 2002b).

Devido ao crescimento econômico, inovação tecnológica e expansão do mercado de EEE, há um aumento significativo da geração de resíduos eletroeletrônicos (REE), o que representa um desafio ambiental (HE et al., 2006; KHETRIWAL et al., 2009).

Na União Europeia (UE), foram introduzidas as diretrizes para os REE e para restrição de substâncias perigosas objetivando gerenciar corretamente o crescente fluxo dos resíduos gerados. Por força destas diretrizes, as inovações significativas são feitas pelos fabricantes

para eliminar resíduos (desperdício zero) no ciclo de vida dos produtos na Europa (EUROPEAN COMMISSION, 2003a, 2003b). A maioria dos países em desenvolvimento ainda tem de introduzir tais normas na gestão de resíduos (KUMAR et al., 2005; NNOROM; OSIBANJO, 2008).

No Brasil não há método ou processamento tecnicamente viável que possa utilizar os EEE obsoletos ou purificá-los para disposição com menor dano ao meio ambiente. De um modo geral, EEE não recebem nenhum tratamento e são lançados em aterros sanitários ou lixões junto com o resíduo doméstico. Como solução para este problema tem-se o reaproveitamento dos metais e polímeros contidos nos EEE. Assim, deixarão de ser desperdiçadas quantidades de alumínio, cobre, e polímeros, que poderão gerar receita, já que estes compostos são indispensáveis aos processos de fabricação (ABRELPE, 2012).

A reciclagem de lixo eletrônico resulta em uma série de benefícios tais como a economia de energia e redução de contaminações, quando sucatas de ferro e aço são usados em vez de materiais virgens, ocasionando significativa economia de energia (CUI; FORSSBERG, 2003; CUI; ZHANG, 2008).

O processo de reciclagem de lixo eletrônico é dividido na etapa de desmontagem, feita de forma seletiva, visando selecionar componentes perigosos ou valiosos para tratamento especial, a etapa de enriquecimento, onde se usam processos mecânico e/ou metalúrgico para concentrar materiais desejáveis, sendo preparados para o processo de refino e a etapa de refino onde materiais são recuperados ou purificados por meio químico, de modo a serem aceitáveis em seus usos originais (CUI; FORSSBERG, 2003; CUI; ZHANG, 2008).

Os metais preciosos contidos em telefones celulares, calculadoras e em placas de circuito impresso (PCI) constituem mais de 80% do valor e em placas de TV e leitor de DVD os metais contribuem com cerca de 50%. Um dos principais atrativos para reciclagem de lixo eletrônico na indústria é a recuperação de metais preciosos (CUI; ZHANG, 2008).

Uma vez que a composição de metais varia de acordo com o modelo da PCI, a etapa de caracterização dos materiais é essencial para se definir os processos mecânicos, hidrometalúrgicos e pirometalúrgicos que serão utilizados isoladamente ou em conjunto visando à recuperação e reciclagem de materiais. Os processos mecânicos, hidrometalúrgicos e pirometalúrgicos têm como objetivo principal a reciclagem de materiais com valor agregado, diminuindo, assim, o consumo de recursos naturais, além de aumentar a vida útil de aterros sanitários (MORAES, 2011).



## 2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo a caracterização das placas de circuito impresso, quanto a composição e periculosidade, bem como estudar a recuperação de cobre por meio da utilização de diferentes misturas de coagulante e floculante, bem como pela aplicação de processo eletrolítico.

### 2.1 Objetivos Específicos

- Estudar o processamento mecânico das PCI e observar a ocorrência de concentração mássica dos metais, utilizando-se a separação granulométrica e a separação gravimétrica;
- Na técnica de caracterização, quanto à composição, verificar a presença de metais preciosos e o metal em maior concentração, além da tendência de concentração dos demais metais;
- Caracterizar as PCI quanto à periculosidade verificando as concentrações de cádmio, chumbo e mercúrio e comparar aos valores máximos permitidos pela norma ABNT 10004;
- Analisar a eficiência na remoção dos metais, utilizando-se misturas líquidas de coagulante e floculante, em diferentes proporções;
- Estudar a remoção de cobre por meio de processo eletrolítico;
- Estimar a receita média gerada com a recuperação de alguns metais, ao se processar as PCI dos telefones descartados no Brasil em 2013.



### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 Resíduos Eletroeletrônicos (REE)

A rápida evolução tecnológica com a consequente diminuição da expectativa de vida média dos EEE ocorreu devido às mudanças nas funções e *designs*. Portanto, houve um aumento na geração de resíduos tornando-se um grave problema ambiental. Diretrizes na UE para os REE foram estabelecidas e têm incentivado seu tratamento de forma ambientalmente eficiente (EUROPEAN COMMISSION, 2003a; PARK; FRAY, 2009).

Ao serem comercializados na UE, os EEE precisam obedecer à legislação local, sendo as mais importantes a diretriz que restringe o uso de substâncias perigosas (*RoHS*, em inglês) e a diretriz que regulamenta o descarte dos resíduos dos equipamentos elétricos e eletrônicos (*WEEE*, em inglês). A diretriz *RoHS* restringe o uso de substâncias nocivas (Pb, Hg e Cd) em EEE nos estágios de fabricação e produção preconizando que produtos contendo as substâncias restritas tiveram de ser reprojatados ou removidos do mercado desde 1º de Julho de 2006. Já a diretriz *WEEE* abrange o tratamento e a reciclagem de EEE. Foi criada para encorajar a reutilização e reciclagem de REE, reduzindo seu descarte. Impõe aos fabricantes o pagamento pela coleta de seus produtos no fim de sua duração, estabelecendo pontos centrais e metas de reutilização, reciclagem e recuperação a serem cumpridas (EUROPEAN COMMISSION, 2003a, 2003b).

Muitos REE são dispostos junto ao lixo doméstico o que acarreta perda de materiais valiosos e danos ao meio ambiente. Exceção feita aos grandes aparelhos, conhecidos como “linha branca” (geladeiras, fogões, etc.), cujos materiais são reutilizados pela indústria de produção secundária de metais. Os equipamentos menores são depositados em aterros sanitários ou queimados sem nenhum tratamento prévio (BERBADES et al., 1997; ZHANG et al., 1998; ZHANG; FORSSBERG, 1999).

Parte dos REE é composta por baterias, telefones celulares, computadores, PCI (utilizadas em EEE), monitores, impressoras, dentre outros, que chegam ao fim da sua vida útil, devido a avarias ou obsolescência tecnológica (ZHANG S., 1998). Estimativas indicam a geração de cerca de 40 milhões de toneladas destes resíduos a cada ano, ou seja, aproximadamente 5% dos resíduos sólidos gerados no mundo (FORSSBERG, 1998). A maior parte destas sucatas é descartada junto com o lixo doméstico, ocasionando poluição ambiental e perda de materiais, ou fica guardada em casa ou em depósitos à espera de destinação final (HUISMAN et al., 2008).

Os REE contêm grande variedade de substâncias orgânicas e inorgânicas em sua composição, dependendo em grande parte do tipo, fabricante e idade do equipamento. Podem conter até 61% de metais e 21% de plástico. Polietileno, polipropileno, poliésteres e policarbonatos são típicos componentes do material plástico presente (LEHNER, 1998; BLEIWAS; KELLY, 2001). Muitos dos materiais, tais como substâncias cloradas e bromadas, metais, ácidos, materiais plásticos e aditivos plásticos presentes nestes resíduos são altamente tóxicos. Por outro lado, REE são importante fonte de metais base e preciosos com elevado potencial econômico como mostrado na Tabela 1 (; WIDMER et al., 2005; HE et al., 2006; GRAMATYKA et al., 2007; LI et al., 2007; YOO et al., 2009; HUANG et al., 2009; GUO et al., 2009; DEVECI et al., 2010).

**Tabela 1** – Composição dos REE (Adaptado de WIDMER et al., 2005).

<b>Material</b>	<b>Conteúdo (%)</b>
Metais	
Ferro e Aço	47,9
Cobre	7,0
Alumínio	4,7
Não-ferrosos	1,0
Total	60,6
Plásticos	
Retardadores de chama	5,3
Não retardadores de chama	15,3
Plásticos totais	20,6
Vidro	5,4
Borracha	0,9
Madeira e	2,6
Cerâmica	2,0
PCI	3,1
Outros	4,6

Exemplos da composição de metal de diferentes REE são mostrados na Tabela 2 e estão disponíveis na literatura. Não há composição média de sucata, até mesmo os valores apresentados como médias típicas realmente representam apenas sucata de uma certa idade e fabricante. A espessura da camada de contato que nos anos 80 variava de 1,0 a 2,5 mm, em aparelhos modernos varia de 300 a 600 nm (TELLER, 2006; CUI; ZHANG, 2008).

**Tabela 2** – Composição metálica, em percentual mássico, para diferentes REE (Adaptado de CUI; ZHANG, 2008).

<b>Resíduo eletrônico</b>	<b>% mássico</b>					
	<b>Fe</b>	<b>Cu</b>	<b>Pb</b>	<b>Ag</b>	<b>Au</b>	<b>Pd</b>
Placas de tv	28	10	1	0,28	0,002	0,0010
Placas de PC	7	20	1,50	0,10	0,025	0,0110
Placas de telefones celulares	5	13	0,30	0,14	0,035	0,0210
Placas DVD player	62	5	0,30	0,01	0,001	0,0004
Sucatas de calculadoras	4	3	0,10	0,03	0,005	0,0005
Placa mãe de PC	4,50	14,30	2,80	0,06	0,056	0,0124
PCI	12	10	1,20	0,03	0,011	-
Resíduo eletrônico típico	8	20	2	0,20	0,100	0,0050

### 3.2 Telefones Celulares

O número de linhas ativas de telefones celulares no mundo, ao final de 2013, foi estimado em 6,8 bilhões (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2013). No Brasil, a ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações) divulgou que o mês de março de 2014 se encerrou com mais de 273,58 milhões de linhas ativas (ANATEL, 2014). Dados divulgados pela empresa americana de consultoria em tecnologia da informação, *Gartner*, mostram que no ano de 2013 foram vendidos 1,8 bilhões de aparelhos celulares no mundo (GARTNER, 2014). No mesmo ano foram vendidas no Brasil 68,1 milhões de novas unidades (TELECO, 2014).

Devido ao rápido crescimento econômico, aos avanços tecnológicos e à obsolescência dos EEE no mercado, a quantidade de resíduos de telefonia celular vem crescendo, acarretando o descarte anual de centenas de milhões de telefones celulares (ONGONDO, 2011). Além disso, o aumento da produção de telefone celular eleva a quantidade de resíduos gerados durante o processo de fabricação. Um aparelho de telefone celular consiste de carcaça polimérica, PCI, display de cristal líquido (*LCD*), placa mãe, antena, etc. Entre estas peças, PCI contém materiais perigosos, bem como grande variedade de metais valiosos. Portanto, a reciclagem eficiente de uma PCI de telefone celular recupera metais valiosos além de evitar a poluição do meio ambiente (WILLIAMS, 2011; KIM et al., 2011).

Um aparelho de telefone celular é mantido pelos usuários, nos Estados Unidos, por até 18 meses, mesmo estando em perfeito funcionamento, sendo que, após este período, muitos são esquecidos nos armários ou descartados no lixo doméstico (EPA, 2012). Nos Estados Unidos, no ano de 2011, foram descartados 141 milhões de celulares (EPA, 2013). Dos celulares fabricados no Brasil, entre 10 e 20% entram em inatividade a cada ano (SILVEIRA et al., 2013).

Grande parte dos componentes dos aparelhos de telefones celulares pode ser reciclada, embora, no Brasil, apenas 2% dos aparelhos celulares são reciclados, enquanto que 32% dos aparelhos são simplesmente guardados em casa, 29% são repassados para outras pessoas e 10% são descartados no lixo doméstico (KASPER, 2011).

Além dos riscos à saúde e ao meio ambiente associados à disposição incorreta das sucatas de telefones celulares, deve-se levar em conta que cada tonelada destes aparelhos contém, em média, cerca de 3,5 kg de Ag, 340 g de Au, 140 g de Pd e 130 kg de Cu, ocasionando consideráveis perdas econômicas (SCHUELP et al., 2009). Deve-se considerar, também, os riscos ambientais associados à geração de resíduos provenientes das etapas de mineração para obtenção das matérias primas (KASPER, 2011).

### **3.3 Placas de Circuito Impresso (PCI)**

Muito utilizadas em toda a indústria de eletrônicos, principalmente a de informática, sendo constituídas por uma placa ou cartão onde são impressas trilhas de cobre. Enquanto que a placa se comporta como isolante (dielétrico), as trilhas de cobre têm a função de conectar eletricamente os diversos componentes e as funções que representam (ANDRADE, 2002).

Sua taxa média mundial de fabricação aumentou 8,7%, nos últimos anos. Esse número é maior no Sudeste da Ásia (10,8%) e na China Continental (14,4%) (LI et al., 2007). Entretanto, tanto a inovação tecnológica quanto a intensa comercialização continuam a acelerar a taxa de atualização dos EEE e encurtar seu tempo de vida média. Como resultado, a quantidade de resíduos de PCI vem aumentando drasticamente. No mundo são gerados de 20 a 50 milhões de toneladas de REE ao ano e estes valores estão subindo três vezes mais rápido do que outras formas de resíduos sólidos urbanos (BURKE, 2007; HUANG et al., 2009).

A maior fração de metais presentes nos REE está contida nas PCI, sendo as mesmas particularmente ricas em cobre e metais preciosos, como mostrado na Tabela 3, o que contribui para seu potencial econômico (TUNCUK et al., 2012). Portanto, o principal atrativo para a reciclagem dos REE é o seu teor de metais preciosos, que também é de importância prática para a seleção de processos com melhor relação custo/benefício. REE que contém menos de 100 ppm de Au, tais como PCI de aparelhos televisores são considerados de baixo valor (grau), sendo necessária a seleção de métodos de baixo custo para o tratamento destes resíduos (HAGELÜKEN, 2006a; YAZICI; DEVECI, 2009; DEVECI et al., 2010).

**Tabela 3** – Composição e valoração dos REE (adaptado de TUNCUK et al., 2012).

Tipo de resíduo eletrônico	Conteúdo (%) e a contribuição para o potencial econômico (%) (em parênteses)								Referência
	Fe (%)	Cu (%)	Pb (%)	Sn (%)	Ni (%)	Au (%)	Ag (%)	Pd (%)	
Preço (US \$/t) <sup>a</sup>	525	9211	242	25900	24180	4,9 x 10 <sup>7</sup>	1,06 x 10 <sup>6</sup>	2,68 x 10 <sup>7</sup>	
Placas de PC	7	20	1,5	2,9	1	0,025	0,100	0,011	(HAGELÜKEN, 2006a)
	(0)	(10)	(0)	(4)	(1)	(64)	(5)	(15)	
Placas de PC	2,1	18,5	2,7	4,9	0,4	0,009	0,069	0,031	(YAZICI et al., 2010)
	(1)	(10)	(0)	(7)	(1)	(26)	(4)	(51)	
Placas de TV <sup>b</sup>	0,04	9,2	0,003	0,72	0,01	3 x 10 <sup>-4</sup>	86 x 10 <sup>-4</sup>	3,7 x 10 <sup>-4</sup>	(DEVECI et al., 2010)
	(0)	(61)	(0)	(13)	(0)	(11)	(7)	(7)	
Placas de TV	28	10	1	1,4	0,3	2 x 10 <sup>-3</sup>	0,028	1 x 10 <sup>-3</sup>	(HAGELÜKEN, 2006a)
	(5)	(28)	(1)	(10)	(2)	(30)	(9)	(8)	
Telefones celulares	5	13	0,3	0,5	0,1	0,035	0,138	0,021	(HAGELÜKEN, 2006a)
	(0)	(5)	(0)	(0)	(0)	(67)	(6)	(22)	
Grau do minério	25	0,5	5	0,5	0,5	1 x 10 <sup>-4</sup>	-	-	

<sup>a</sup> Preço do metal extraído de *London Metal Exchange Office (LME)* (14/12/2010)

<sup>b</sup> Resíduos sem componentes

A composição média de uma PCI é mostrada na Tabela 4, consistindo de vários metais, incluindo metais preciosos tais como ouro, prata e paládio. Uma alternativa para recuperação destes metais preciosos das PCI é seu processamento mecânico (GLOE et al., 1990). Há diversos estudos sobre a reciclagem por processos mecânicos, térmicos e químicos, mas a maioria deles trata da reciclagem dos materiais que a compõem (ZHANG; FORSSBERG, 1997; ZHANG et al., 1998; GOOSEY; KELLNER, 2002a; WILLIAMS; WILLIAMS, 2007; OISHI et al., 2007).

**Tabela 4** – Composição e valor intrínseco de metais nas PCI (adaptado de GOOSEY; KELLNER, 2002b).

Componente	%	Valor <sup>a</sup> (US \$/kg)	Valor intrínseco PCI	
			(£/kg de PCI)	(%)
Ouro	0,025	49000,00	12,25	65,76
Paládio	0,010	26800,00	2,68	14,38
Prata	0,100	1060,00	1,06	5,69
Cobre	16,0	9,21	1,47	7,91
Alumínio	5,0	2,29	0,11	0,61
Ferro	5,0	0,52	0,02	0,13
Estanho	3,0	25,9	0,77	4,17
Chumbo	2,0	0,24	0,004	0,02
Níquel	1,0	24,18	0,24	1,29

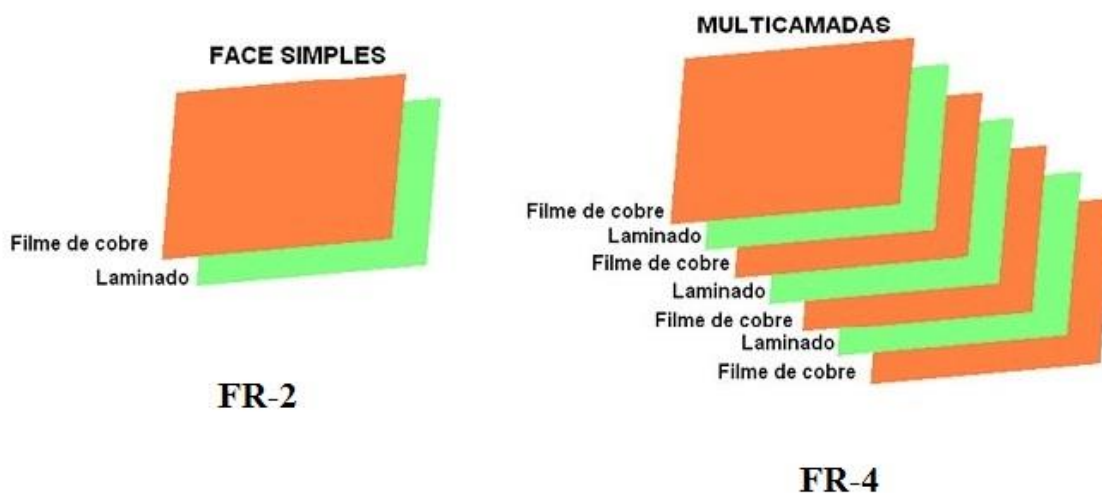
<sup>a</sup> Preço do metal extraído de *London Metal Exchange Office (LME)* (14/12/2010)

Esta composição varia de acordo com o modelo de equipamento, pois a placa pode ser fabricada em celulose ou fibra de vidro e o número de camadas de cobre pode variar. A tecnologia de fabricação também influencia a composição, pois os aparelhos mais antigos

contêm soldas com liga de estanho e chumbo, enquanto que atualmente observa-se uma tendência na substituição por ligas Sn/Ag ou Sn/Bi, isentas de chumbo (KASPER, 2011).

A composição varia de metais e ligas metálicas a compostos orgânicos e inorgânicos cuja distribuição, em peso, é, aproximadamente, 30% de polímeros (epóxi e poliéster), 30% de óxidos refratários (sílica, alumina, óxidos de terras raras), 40% de metais base (Cu, Fe, Sn, Ni, Pb, Al e Zn), além de metais preciosos (WU, B. Y. et al., 2008).

Dois tipos de PCI são mostrados na Figura 1 e normalmente são utilizados em computadores pessoais, telefones celulares e pequenos dispositivos eletrônicos. O tipo *FR-4* é composto de multicamadas de laminado (resina epóxi e fibra de vidro) e cobre. Já o *FR-2* é composto de uma única camada de laminado (resina fenólica e papelão) com uma camada de cobre. O tipo *FR-4* é usado em telefones celulares e o *FR-2* é usado em televisores (ABRACI, 2002; LADOU, 2006; WILLIAMS; WILLIAMS, 2007; MURUGAN *et al.*, 2008).



**Figura 1** – Tipos de PCI (adaptado de ABRACI; ANDRADE, 2002).

A tecnologia de processamento para a reciclagem de metais valiosos de PCI é dividida nas etapas de enriquecimento do conteúdo metálico por um pré-tratamento mecânico e na de extração e refino para recuperação dos metais por processos pirometalúrgico e hidrometalúrgico. Na pirometalurgia há a dificuldade de recuperação de alguns metais, tais como alumínio, ferro, e metais raros, além da perda de metais preciosos. Ultimamente os processos hidrometalúrgicos têm sido utilizados consideravelmente na recuperação de metais preciosos, bem como metais raros das PCI (KIM et al., 2011).

Sucatas de PCI representam cerca de 3%, em peso, da quantidade total dos REE, além de conter vários metais preciosos e outros perigosos, sendo considerados materiais atraentes e também contaminantes ambientais (WILLIAMS; WILLIAMS, 2007). No entanto, seu processamento representa um desafio devido à composição heterogênea que possui. Isto demonstra a necessidade de se buscar soluções para este tipo de sucata, a fim de proporcionar um descarte adequado sem prejudicar o meio ambiente. Portanto, reciclagem de PCI é assunto importante, não só por tratar da reciclagem de materiais valiosos bem como do tratamento de resíduos perigosos ao meio ambiente (LI; LU; XU; et al., 2008; YOO et al., 2009; LONG et al., 2009).

### 3.4 Legislação

As principais normas regulamentadoras da questão do lixo eletrônico no mundo são a convenção da Basileia, as diretivas WEEE e RoHS em vigor na União Europeia, a China RoHS (cópia da RoHS Europeia) em vigor na China e a *Home Appliance Recycling Law*, em vigor no Japão (ANDUEZA, 2011).

No Brasil a Lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos - Lei nº 12.305, de 2010, após duas décadas de tramitação no Congresso Nacional, se tornou o marco regulatório da gestão de resíduos sólidos no país e vem trazendo uma profunda mudança de paradigma quanto ao tema. Com o advento desta lei, o gerenciamento de resíduos é feito de modo amplo, englobando qualquer atividade que possa impactar o meio ambiente.

Trata-se de legislação moderna e específica, focada na não geração e no máximo aproveitamento dos resíduos, prevendo responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, de forma individualizada e encadeada entre os diversos *players* do mercado: fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, além de consumidores e titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos (CEMPRE, 2010).

Não restam dúvidas que os avanços desta lei estão presentes, assim como os desafios. O maior avanço foi estabelecer uma política nacional com validade em todo país e ampla abrangência, já que estão sujeitos à observância da lei pessoas físicas e jurídicas, de direito público e privado, responsáveis direta e indiretamente pela geração de resíduos sólidos (CEMPRE, 2010).

Ainda trouxe metas arrojadas, como a implantação do sistema de logística reversa que é destinado a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial. Estão submetidos à implantação do sistema de logística reversa os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de pilhas e baterias, lâmpadas fluorescentes, produtos eletroeletrônicos, pneus, agrotóxicos e óleos lubrificantes, suas embalagens e resíduos. Os acordos setoriais em relação aos equipamentos eletroeletrônicos e seus resíduos encontram-se em fase de negociação com previsão de assinatura de acordo no ano de 2015 (VELOSO, 2014).

Por outro lado, desafios não faltam. O primeiro grande desafio é cumprir o prazo previsto em lei, que passou de agosto de 2014 para agosto de 2018, para que os lixões sejam desativados. O outro grande desafio é fazer com que o poder público implemente a rede de medidas e instrumentos de incentivos fiscais, financeiros ou creditícios para as indústrias e entidades ligadas à reciclagem, para os projetos relacionados à responsabilidade pelo ciclo de vida dos produtos e empresas dedicadas à limpeza urbana e atividades a ela relacionadas (CEMPRE, 2010).

### 3.5 Cobre

É um metal muito usado, desde há muito tempo, nas mais variadas aplicações, devido à sua resistência à corrosão, natureza não tóxica e excelente condutibilidade térmica e elétrica. Apresenta boa resistência em vários ambientes industriais, bem como em meios aquosos. Suas propriedades antimicrobianas fazem com que mais de 99,9% das bactérias sejam eliminadas de uma superfície em apenas duas horas de exposição, sendo muito utilizado em estabelecimentos de saúde (COPPER, 2012). Apresenta um potencial nobre relativamente ao hidrogénio, não sendo normal ocorrer a redução do hidrogénio no processo de corrosão (CRUZ, 2010).



De acordo com os dados revelados no sumário mineral publicado em 2014 pelo DNPM (Departamento Nacional de Recursos Minerais, o Brasil possui 1,6% das reservas mundiais de minério de cobre (RIBEIRO, 2014).

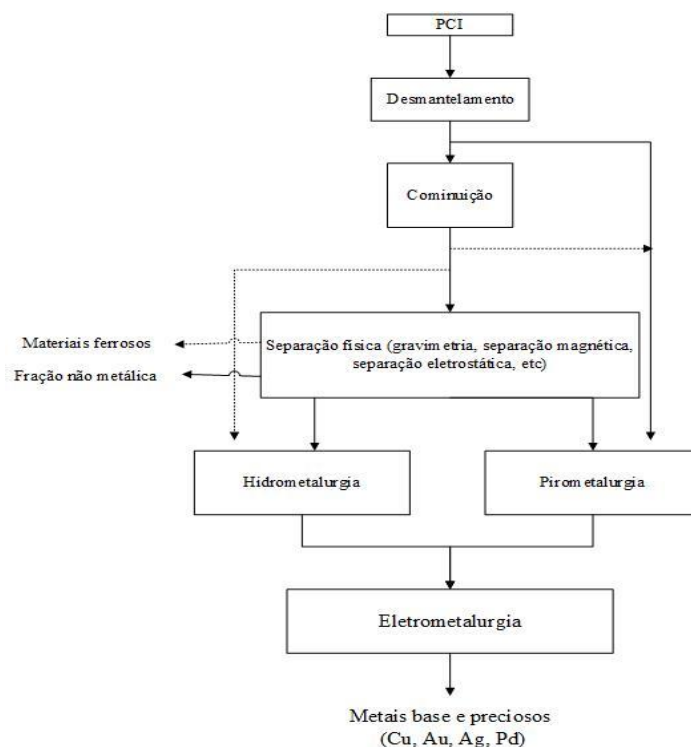
O cobre é um dos metais mais amigáveis para o meio ambiente, uma vez que é 100% reciclável e pode ser reutilizado muitas vezes. Hoje em dia, cerca de 30 % da demanda global do cobre é obtida de cobre reciclado (PROCOBRE, 2013), atingindo 44,8 % na Europa (GREENPEACE, 2012).

Na produção de cobre primário há considerável consumo de energia, necessidade de transporte de grandes volumes de minério e as instalações para uma produção em grande escala são caras (VEIT, 2005). Já na produção do cobre secundário, há economia de cerca de 85 % de energia e baixa produção de lixo industrial em comparação ao gerado pelo cobre primário (GREENPEACE, 2012).

O saldo da balança comercial do cobre no ano de 2013 apontou um consumo 61,80 % maior que o produzido, indicando que o Brasil é um importador de cobre (RIBEIRO, 2014). A produção do cobre secundário correspondeu a apenas 13 % do primário no ano de 2012 (RIBEIRO, 2013).

### 3.6 Métodos de Tratamento de Placas de Circuito Impresso (PCI)

A Figura 2 apresenta os principais métodos de tratamento utilizados no beneficiamento de placas de circuito impresso. A etapa inicial consiste em concentrar os metais em uma fase para que, em seguida, seja realizada a recuperação dos metais.



**Figura 2** – Etapas do processo de reciclagem das PCI (Adaptado de Yazıcı and Deveci, 2009).

### 3.6.1 Processos mecânicos

Usados na metalurgia primária como parte das etapas de tratamento e beneficiamento de metais e minérios, sendo que na reciclagem de metais provenientes de sucatas eletrônicas são utilizados como pré-tratamento para o reaproveitamento de metais (VEIT et al., 2002).

Envolvem operações unitárias de tratamento de minérios, tais como, desmantelamento, moagem, classificação granulométrica, separação em meio denso, flotação, separação magnética e separação eletrostática, buscando a separação física ou a concentração de materiais a partir de REE (LUZ et al., 2004).

Nos REE há uma grande variedade de materiais com diferentes propriedades físicas, as quais podem ser facilmente exploradas para separação de metais a partir de componentes não-metálicos (ZHANG; FORSSBERG, 1997). A Tabela 5 apresenta métodos de separação física que utilizam as diferenças destas propriedades dos componentes e que são utilizadas para a sua separação. Vários métodos de separação, baseados nestas diferenças, têm sido utilizados como separação por gravidade, separação magnética e separação eletrostática visando reciclar metais a partir de REE (ZHANG S.; FORSSBERG, 1998; GALBRAITH; DEVEREUX, 2002; CUI; FORSSBERG, 2003; ZHAO et al., 2004; LI et al., 2007; TUNCUK et al., 2012).

**Tabela 5** – Métodos de separação baseados nas propriedades físicas (adaptado de ZHANG S.; FORSSBERG, 1998; CUI; FORSSBERG, 2003).

Método	Critério de separação	Materiais a serem separados
Separação gravimétrica	Densidade	Metálicos de plásticos
Separação magnética	Suscetibilidade magnética	Material magnético de não magnético
Separação eletrostática	Condutividade elétrica	Metálicos de não-metálicos

### 3.6.2 Pirometalurgia

Tem como mecanismo a concentração de uma fase metálica e de uma fase contendo escória. Na fase metálica os metais estarão em maior concentração, pois os materiais cerâmicos ficam concentrados na escória e os polímeros são degradados termicamente através da quebra de ligações químicas das cadeias orgânicas através do calor (HOFFMANN, 1992).

Trata-se de um processo muito utilizado pelas indústrias na reciclagem de metais preciosos, devido ao fato de aceitar qualquer tipo de sucata eletrônica, não requerer pré-tratamento e ter poucas etapas (VEIT, 2005).

Este processo é adequado para o tratamento dos REE em que os constituintes orgânicos podem parcial ou totalmente substituir o coque como combustível e agente redutor. No entanto, é um processo de elevados consumo energético e custo de implantação e operação, pois há necessidade de alta alimentação no forno. A presença de retardadores de chama halogenados nas PCI e sua posterior queima leva à formação de dioxinas e furanos que representam problemas ambiental e de saúde pública, sendo o tratamento deste composto gasoso um pré-requisito para a implantação deste processo (HAGELÜKEN, 2006a, 2006b; CUI; ZHANG, 2008; PETTER, 2012).

Como principais problemas relacionados ao processamento pirometalúrgico de sucatas eletrônicas tem-se a perda de metais por volatilização, o aumento da quantidade de escória devido à presença de vidros e cerâmicas, causando perda de metais nobres e metais base, e a baixa taxa de recuperação de alguns metais, como estanho e chumbo, ou impossibilidade da reciclagem de outros (ex. alumínio e zinco) (KASPER, 2011).

A transformação pirometalúrgica é a tecnologia mais tradicional para a reciclagem de metais preciosos provenientes de sucatas eletrônicas. No entanto, as usinas de última geração demandam grandes investimentos, devido principalmente aos cuidados ambientais necessários, o que fez com que nos últimos anos as atenções se voltassem para outros tipos de processos (CUI; ZHANG, 2008; HUANG et al., 2009).

### 3.6.3 Hidrometalurgia

Envolve operações unitárias de lixiviação de materiais, sucatas ou resíduos nos quais ocorre a dissolução de metais pela ação de soluções aquosas ou agentes lixiviantes. A ação destes agentes pode ou não ser seletiva com relação aos materiais que serão solubilizados (JACKSON, 1986).

Comparada à pirometalurgia, oferece relativamente baixo custo financeiro, redução do impacto ambiental, sem emissão de gases e poeiras tóxicos, além de proporcionar alta recuperação de metal sendo muito utilizada em aplicações de pequena escala. Estes atributos a tornam uma interessante alternativa no tratamento dos REE (YAZICI; DEVECI, 2009).

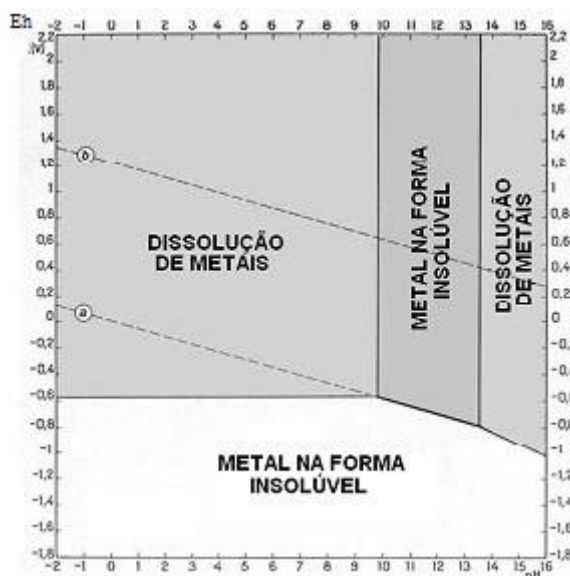
Tem como etapas o pré-tratamento mecânico dos resíduos, a lixiviação dos metais, a purificação de solução de lixiviação concentrada. Uma vez que os elementos metálicos são geralmente cobertos com uma variedade de materiais plásticos ou cerâmicos, o processo mecânico de pré-tratamento é necessário para expor os metais de interesse à ação do agente lixiviante (DALRYMPLE et al., 2007; CUI; ZHANG, 2008; YOO et al., 2009).

A lixiviação é o processo de separação em meio aquoso pelo qual se obtém uma concentração elevada de íons aquosos do metal de valor na solução. Há a transferência de metais presentes nos REE utilizando como agentes lixiviantes soluções ácidas, alcalinas e salinas. As condições para que isso ocorra são determinadas com o auxílio de gráficos termodinâmicos (VOLSKY; SERGIEVSKAYA, 1978).

O sucesso do processo baseia-se na capacidade de se extrair seletivamente o metal de valor que é representado por uma posição favorável entre as linhas que descrevem a concentração dos íons em função do pH, ou seja, enquanto a concentração dos íons do metal de valor deve ser elevada, o inverso deve ocorrer com os íons das impurezas (GRAMATYKA et al., 2007).

O diagrama de *Pourbaix*, representado na Figura 3, é o instrumento utilizado no planejamento do processo de lixiviação e estuda, através da representação gráfica do equilíbrio termodinâmico, o comportamento de metais em soluções aquosas como função do pH e de  $E_h$  (potencial do eletrodo). Sua construção depende do estudo do equilíbrio das reações (POURBAIX, 1974).

É construído em sistemas metal/água a uma dada temperatura, onde são determinadas as regiões de estabilidade das diversas fases condensadas e solúveis (forma iônica) (JACKSON, 1986).



**Figura 3** – Esquema de diagrama  $E_h/pH$  (adaptado de JACKSON, 1986).

São identificadas na Figura 3 as áreas que representam a estabilidade termodinâmica dos diferentes compostos metálicos em função do pH e de  $E_h$  a uma dada temperatura. A região descrita como “metal na forma insolúvel” é a zona na qual o metal apresenta um comportamento inerte ou se mantém em sua forma metálica (POURBAIX, 1974).

A zona de dissolução de metais é a região onde as reações de lixiviação são possíveis e, portanto, o metal encontra-se na forma iônica estável. A área de metal na forma insolúvel é a zona na qual ocorrem as reações de formação de óxidos ou de hidróxidos insolúveis (POURBAIX, 1974).

A área delimitada pelas linhas “a” e “b” representa a região de estabilidade da água, isto é, acima da linha “b” tem-se a evolução de  $O_2$  (potencial oxidante) e abaixo da linha “a” tem-se a liberação de  $H_2$  (potencial redutor) (POURBAIX, 1974).

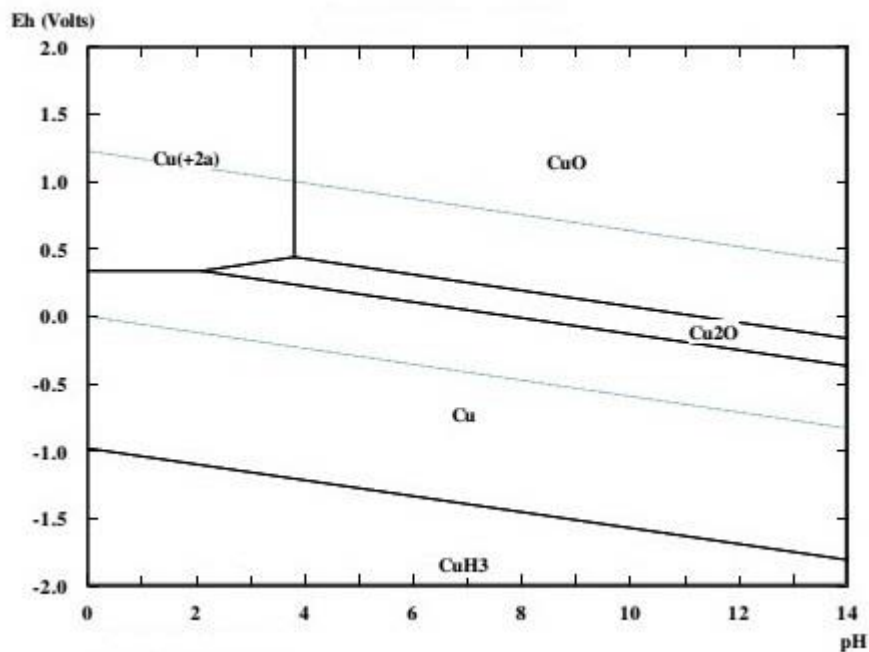
Entre as linhas de equilíbrio da água tem-se as reações representadas pelas equações 1, 2 e 3.



No potencial negativo ocorre um processo de redução e abaixo da linha “a” é representada a decomposição da água liberando  $H_2$  (gás hidrogênio), enquanto que no potencial positivo ocorre um processo de oxidação e acima da linha “b” é representada a decomposição da água liberando  $O_2$  (gás oxigênio).

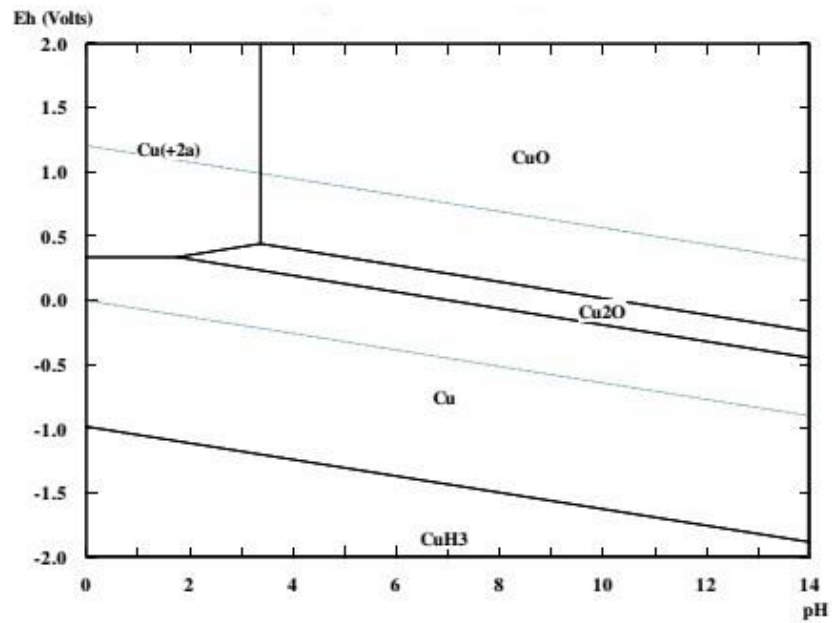
Este comportamento de oxidante e redutor define quando um metal é nobre, isto é, quando um metal não sofre dissolução sem ter a ação de um agente oxidante externo (JACKSON, 1986).

O diagrama de *Pourbaix* do sistema Cu-H<sub>2</sub>O a 25 °C, conforme mostra a Figura 4, apresenta as espécies do cobre, mostrando as regiões onde o cobre apresenta-se na forma iônica ou solúvel. O campo de estabilidade do íon de cobre solúvel (Cu<sup>2+</sup>) se localiza em valores de pH variando de 0 a 4 e em E<sub>h</sub> variando de 0,4 V a 2,0 V. Logo, o uso de agente oxidante pode facilitar a dissolução de metais, pois este agente tende a aumentar o potencial positivo de modo a provocar a reação de cobre metálico transformando-se em Cu<sup>2+</sup>, conforme mostra equação 4 (GRAMATYKA et al., 2007).

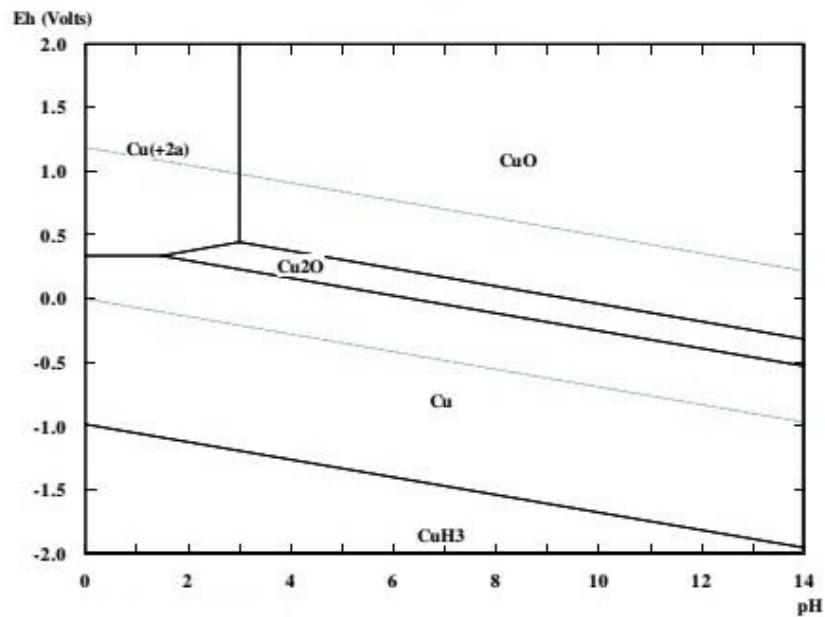


**Figura 4** – Diagrama E<sub>h</sub>/pH do sistema cobre-água a 25°C (adaptado de JACKSON, 1986).

As Figuras 5 e 6 apresentam os diagramas de *Pourbaix* para o sistema cobre-água a 50 e 75°C, respectivamente. O campo de estabilidade do Cu<sup>2+</sup> diminui com o aumento da temperatura e o potencial permanece praticamente inalterado com a temperatura. Portanto, com o aumento da temperatura, a lixiviação do cobre ocorre em valores mais baixos de pH (POURBAIX, 1974).

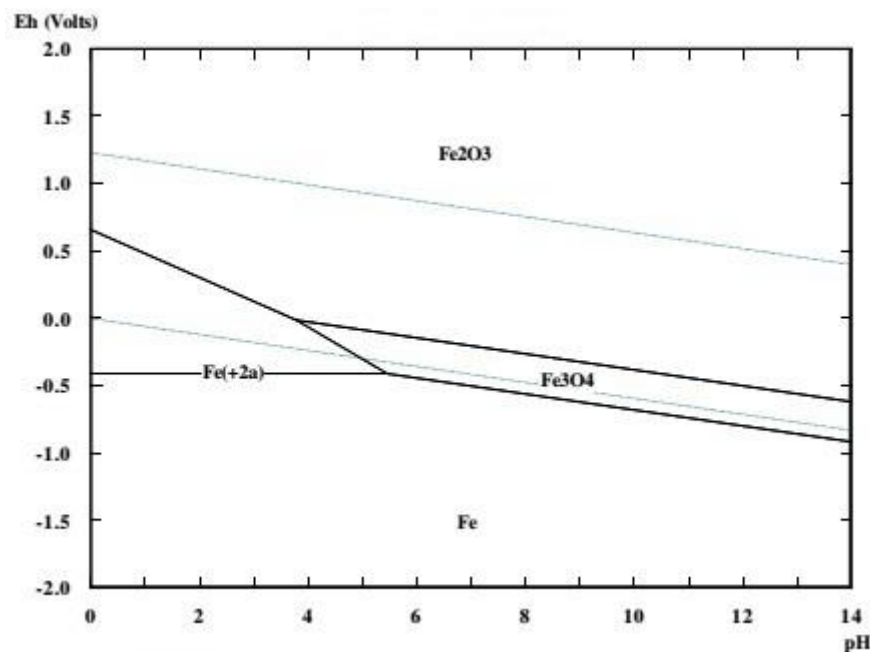


**Figura 5** – Diagrama  $E_h/pH$  do sistema cobre-água a 50°C (adaptado de JACKSON, 1986).



**Figura 6** – Diagrama  $E_h/pH$  do sistema cobre-água a 75°C (adaptado de JACKSON, 1986).

Esta área de solubilidade varia de metal para metal, como mostra a Figura 7, o que pode facilitar a escolha do pH e do  $E_h$  ideal para se desenvolver o processo de lixiviação (POURBAIX, 1974).



**Figura 7** – Diagrama Eh/pH do sistema ferro-água a 25 °C (adaptado de JACKSON, 1986).

Fazendo-se a comparação entre os sistemas Fe-H<sub>2</sub>O e Cu-H<sub>2</sub>O a 25 °C é possível notar a diferença na região de solubilidade dos metais. Para desenvolver um processo de lixiviação contendo cobre e ferro pode ser feita a lixiviação do cobre a partir do pH 3,0 até 3,8 com E<sub>h</sub> superior a 0,4 V. Desta maneira, somente o cobre será solubilizado e o ferro ficará insolúvel na forma do óxido de Fe<sup>3+</sup> (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (POURBAIX, 1974).

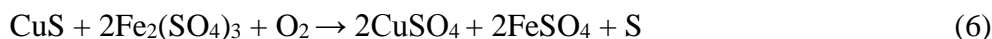
### 3.6.4 Biohidrometalurgia

Os métodos convencionais de reciclagem envolvem rotas hidrometalúrgicas e pirometalúrgias. No entanto, a biolixiviação desponta como um método alternativo na extração de metais base e de metais preciosos da sucata eletrônica (CHOI et al., 2004; BRANDL; FARAMARZI, 2006; ILYAS et al., 2007; YANG et al., 2009).

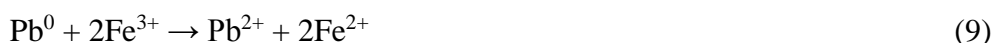
Utiliza as interações entre os micro-organismos e minerais para recuperar metais valiosos. Com base nos processos biológicos tem sido possível recuperar, por exemplo, cobre, ouro e cobalto. A principal aplicação da biohidrometalurgia tem sido a biolixiviação de sulfetos metálicos. As principais vantagens desta técnica são os baixos custos e a simplicidade. Como desvantagem possível, pode-se citar o tempo requerido para a ocorrência do processo, que pode levar semanas, e a necessidade do metal estar em uma forma que fique exposto para o possível ataque microbiano (MORIN et al., 2006; GUO et al., 2009).

A adaptação bacteriana é o primeiro passo no processo de biolixiviação. Através desse processo, a bactéria entra em contato com o resíduo ou minério através de repicagens sequenciais. O processo de adaptação pode ser realizado através da gradual diminuição do íon de Fe<sup>2+</sup> e gradual aumento da concentração de substrato, porém não existe um protocolo ou condições pré-definidas para o período de adaptação, a densidade de polpa ou o efeito inibitório promovido pelas concentrações de íons metálicos (BEVILAQUA et al., 2002; HAGSHENAS et al., 2009; WANG et al., 2009).

O mecanismo pode ser exemplificado a partir da lixiviação do mineral calcocita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), no qual o cobre é lixiviado em meio ácido, como mostra a equação 5, formando a covelita ( $\text{CuS}$  - solúvel), ou pelo íon férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ) formado pela oxidação biológica do íon ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ), conforme descrito na equação 6 (OLSON et al., 2003).



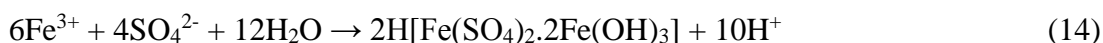
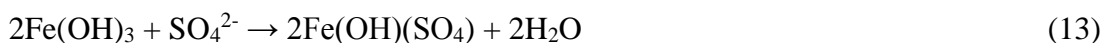
Assim, esta reação pode ser adaptada para a biolixiviação de cobre nas PCI, através da oxidação do Cu, Zn e Pb com a ação do íon férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ) conforme mostrado pelas equações 7, 8 e 9 respectivamente (CHANCEREL; ROTTER, 2009; WANG et al., 2009).



O íon férrico é originário da lixiviação indireta provocada pelo metabolismo das bactérias. As bactérias se utilizam do íon ferroso presente no minério ou no meio de cultura como fonte de energia transformando-o em íon férrico, conforme a descrição do mecanismo mostrado pela equação 10 (EHLICH, 2001; WANG et al., 2009).



Tanto o pH quanto E devem ser monitorados e controlados durante o processo de biolixiviação, pois, em geral, quando o pH aumenta, E diminui, podendo haver a formação de outros subprodutos dependendo da composição da solução como, por exemplo, arsenito férrico, hidróxido férrico, sulfeto férrico básico e jarositas, conforme mostra as equações 11, 12, 13 e 14 respectivamente (BOSECKER, 1997).





Além do pH e de E, os principais parâmetros que são controlados no processo de lixiviação bacteriana são o tempo de contato, a temperatura, as disponibilidades de O<sub>2</sub> e gás carbônico (CO<sub>2</sub>), as concentrações dos íons metálicos e a de nutrientes minerais na lixívia, a composição do mineral e o tamanho das partículas, a interação galvânica entre os minerais presentes e a estrutura química e cristalina destes, além da presença de agentes químicos estranhos ao processo (BOSECKER, 1997; WANG et al., 2009).

Para a aplicação desta técnica na recuperação de metais a partir de PCI, alguns estudos apresentaram a solubilização de metais de 40 % a 60 % de Cu; de 40 % a 80 % de Pb e de 50 % a 90 % de Zn, sendo que os melhores resultados foram com uma cultura mista composta de *A. ferroxidans* e *A. thiooxidans* em concentração de 7,8 g/L de resíduo de PCI com tamanho de partículas entre 0,5 e 1,0 mm (WANG et al., 2009).

Estudos comprovaram a viabilidade da biolixiviação de PCI com micro-organismos mesofílicos, cuja temperatura de crescimento varia de 30 a 40 °C e termofílicos, com temperatura ideal entre 40 a 60 °C, visando à recuperação de metais (BRANDL; FARAMARZI, 2006), (YANG et al., 2009).

### 3.6.5 Eletrometalurgia

Processo utilizado para se obter metais separadamente das soluções concentradas oriundas do processamento mecânico. Trata-se de um processo de refino de metais através da eletrólise (DUAN et al., 2011; YAMANE et al., 2011).

O princípio envolve as reações de oxirredução, não espontâneas, em que o metal presente em um material se dissolve sob a forma de íons metálicos e é eletrodepositado no catodo sob a forma pura. Praticamente todo o cobre obtido a partir do minério de cobre é refinado eletroliticamente. Existem dois processos eletrometalúrgicos que podem ser utilizados: eletrorrefino e a eletro-obtenção (ELLINGHAM; MOORE, 1931; GERBASE; OLIVEIRA, 2012).

O processo de eletrorrefino é utilizado, normalmente, com metais fundidos obtidos por métodos pirometalúrgicos. O anodo é constituído pelo metal fundido, ainda contendo certas impurezas (anodo com 99,95 % de cobre). Durante a eletrólise, o metal, sem a impureza do anodo, é eletrodepositado no catodo (VEIT, 2005).

Os metais remanescentes no anodo (prata, ouro, platina, chumbo, estanho, etc.) podem se dissolver no eletrólito ou formar lodos que se acumulam no fundo da célula eletrolítica. O material é recolhido periodicamente e enviado para uma fábrica de derivados de cobre ou unidades de recuperação de metais (BISWAS et al., 2002).

A eletro-obtenção consiste na eletrólise (com anodo insolúvel, inerte) de uma solução aquosa de um sal de metal (sulfato, cloreto, etc), obtida por extração do solvente ou lixiviação do minério ou concentrado. A solução do íon metálico é submetida a uma corrente elétrica, ocorrendo, então, a eletrodeposição do metal no catodo. Normalmente é utilizado o lixiviado que é concentrado em metais dissolvidos e obtido do tratamento hidrometalúrgico. Na eletro-obtenção, metais como cobre, zinco, cádmio, alumínio, metais preciosos, entre outros, podem ser obtidos (GERBASE; OLIVEIRA, 2012).

No processo de eletro-obtenção do cobre pode-se utilizar como anodo inerte uma liga de chumbo-estanho-cálcio, sendo o eletrólito uma solução aquosa contendo o íon metálico. Os produtos obtidos são cobre puro no catodo e gás oxigênio no anodo. Em uma planta de

eletrorrefino de cobre é possível obter cobre com 99,98 % de pureza (BISWAS et al., 2002; GERBASE; OLIVEIRA, 2012).

Na eletro-obtenção são utilizados catodos e anodos, onde um deles é inerte e o outro é feito do metal a ser recuperado. Este metal a ser recuperado pode ser derivado de um processo de lixiviação preliminar ou pela adição de sais metálicos na solução da célula de eletro-obtenção (JACKSON, 1986).

As reações dos anodos geralmente são provocadas pelo desprendimento de O<sub>2</sub> e Cl<sub>2</sub>, conforme as equações 15 e 16.



Os anodos devem ser preferencialmente insolúveis para evitar contaminação da solução lixiviada com outros metais além de poder formar precipitados com os metais derivados da lixiviação, interferindo no processo de eletrodeposição do metal de interesse (JACKSON, 1986).

Os catodos são formados de lâminas finas do metal a ser eletrodepositado. As reações são reversas às reações que ocorrem nos anodos, isto é, os metais em solução são atraídos eletricamente pelo catodo e se reduzem segundo a equação 17 (MORAES, 2011).



A equação 17 apresenta um metal na forma solúvel que recebe elétrons para se reduzir, onde, no processo de refino eletrolítico, estes elétrons são provenientes da corrente contínua ligada nos eletrodos (catodo e anodo) (YAMANE et al., 2011).

### 3.7 Processos Mecânicos

#### 3.7.1 Cominuição

Técnica mecânica de redução do tamanho das partículas. A fragmentação ocorre com os objetivos de formar partículas com tamanho e forma determinadas e também liberar metais para futura concentração. As técnicas utilizadas são impacto, atrito e compressão. O processo de fragmentação pode ser subdividido em britagem e moagem (YOVANOVIC, 1973; FIGUEIRA et al., 2004).

Inicialmente, faz-se a britagem atingindo-se uma granulometria superior a 1 mm. Os equipamentos utilizados são britadores giratórios ou de mandíbula. A moagem é utilizada quando se deseja uma granulometria inferior a 1 mm. No processo de moagem das PCI são utilizados, principalmente, moinhos de martelos e de facas, sendo quase sempre dividido em várias etapas visando obter o tamanho de partícula desejado e assim, minimizar os custos, já

que a operação envolve elevado consumo de energia (PORMIN, 2008; GERBASE; OLIVEIRA, 2012).

O processo de moagem é um método de cominuição ou redução de tamanho para promover a liberação dos metais presentes em minérios, resíduos e sucatas através da ação de uma força bruta que fragmenta a sucata pelo movimento de “martelos”, “bolas” ou “facas” dentro de um compartimento fechado. O mecanismo utilizado pode ser de pressão, impacto, abrasão ou corte. Moinhos verticais e horizontais são os dois tipos de moinhos que são utilizados no processamento de resíduos sólidos (LUZ et al., 1995, 2004; CUI; FORSSBERG, 2003).

Nos moinhos verticais, o resíduo entra pelo topo e deve ser quebrado de modo a passar o mais rápido possível pelos “martelos” ou “facas” em movimento. O controle do tamanho da partícula é ajustado pela distância entre os “martelos” ou “facas” e as paredes. Nos moinhos horizontais os “martelos” oscilam acima de uma grade que pode ser mudada dependendo do tamanho do produto requerido (HAYES, 1993).

Nos moinhos de martelos, a redução é obtida por martelos que giram sobre um eixo. O material é fragmentado pelos martelos e pela colisão com as paredes do moinho. Este moinho tem uma grade na parte inferior onde o material cai após ser suficientemente reduzido (RON; PENEV, 1995).

Já no moinho de corte, a redução é obtida pela fragmentação do material utilizando-se facas montadas em um ou dois eixos girando em direções opostas. Normalmente há uma grade no fundo, sendo especialmente adequado para reduzir materiais elásticos dúcteis (RON; PENEV, 1995).

A fragilização criogênica é um processo que utiliza o congelamento a baixas temperaturas, com o auxílio de nitrogênio líquido, visando aumentar a fragilidade da estrutura, melhorando, assim, a eficiência do moinho e a separação dos materiais (KASPER, 2011).

Há de se observar que o processo de desgaste do equipamento pode incorporar ao resíduo de moagem componentes não presentes em sua composição original, isto é, o resíduo após moagem pode ficar contaminado com o material que foi desgastado do moinho. Assim, o tempo que o resíduo permanece em processamento na parte interna do moinho pode interferir na sua contaminação, além de se considerar as características do material que se deseja moer (CHAVES; PERES, 1999).

Quando se trata da moagem de resíduos abrasivos que geralmente são formados de substâncias silicosas, é importante avaliar o tempo de moagem para não ter problemas associados à contaminação (LUZ et al., 2004).

As PCI são resíduos compostos basicamente de fibra de vidro, polímeros e metais, isto é, com exceção dos polímeros, os materiais que compõem as placas são abrasivos e, portanto, o tempo de processamento destes materiais deve ser o mínimo possível dentro do moinho. Mesmo sendo as PCI compostas de materiais abrasivos, os equipamentos mais utilizados para promover a liberação dos materiais são os moinhos de facas e martelos. (CHAVES; PERES, 1999; LUZ et al., 2004).

Após o processo de moagem se iniciam os processos de concentração de materiais, que podem ser a separação granulométrica, a separação gravimétrica, a separação magnética, a separação eletrostática e a lixiviação (MORAES, 2011).

### **3.7.2 Separação granulométrica**

Técnica utilizada para separar populações de partículas com tamanhos diferentes, mediante a passagem por uma série de peneiras com aberturas fixas e pré-determinadas (CHAVES; PERES, 1999).

As peneiras são superfícies perfuradas ou vazadas sobre as quais se dá o movimento de partículas. As menores que as perfurações tendem a passar, enquanto as maiores permanecem acima da superfície vazada. Esse processo separa o material somente pelo tamanho das partículas e não identifica o material por qualquer outra propriedade (HAYES, 1993).

A eficiência deste peneiramento pode ser afetada por vários fatores tais como, as propriedades do material (densidade, distribuição do tamanho de partículas, forma e superfície das partículas), as configurações do equipamento (área da peneira, % de área vazada, tamanho e forma dos orifícios e espessura da peneira), o ângulo de inclinação e o método de alimentação da peneira (HAYES, 1993).

A etapa de separação opera juntamente com o processo de fragmentação. As partículas de material, obtidas pelo processo de cominuição, devem ser separadas de acordo com o seu tamanho. Esta separação tem como principal objetivo o conhecimento da distribuição granulométrica das partículas (CHAVES; PERES, 1999).

Os equipamentos empregados para a separação do material fragmentado são as peneiras, os classificadores mecânicos e os ciclones. As peneiras podem ser vibratórias, rotativas ou estáticas e são utilizadas para a classificação de partículas mais grosseiras cujo diâmetro está acima de 1 mm. Podem operar a seco e a úmido. Os classificadores mecânicos operam com tamanho de partículas menores que as peneiras (inferior a 1 mm), mas são ineficientes para a separação de partículas muito finas (em média, menores que 0,105 mm). Trabalham quase sempre a úmido. Os ciclones operam com tamanhos de partículas inferiores a 1 mm e são muito eficientes para separarem partículas muito finas. Podem operar a seco ou a úmido (PORMIN, 2008; GERBASE; OLIVEIRA, 2012).

Para os REE a classificação granulométrica é realizada em peneiras vibratórias horizontais por permitir a separação por tamanho de partícula e facilitar a etapa de caracterização dos materiais através de análises químicas possibilitando a identificação das frações que concentram metais, materiais cerâmicos e polímeros (CUI; FORSSBERG, 2003).

### **3.7.3 Separação gravimétrica**

Técnica baseada na diferença de densidade que utiliza um meio fluido, água ou ar para realizar a separação, apresentando bons resultados com baixo custo. Os processos de separação por meio gravimétrico podem ser por líquidos densos ou jigues. A separação por líquidos densos é o processo mais simples e envolve o uso de líquidos com alta densidade relativa. O material a ser separado é adicionado ao líquido (por exemplo, líquidos orgânicos) com um valor de densidade intermediário ao dos dois componentes que se deseja separar. Os particulados de baixa densidade tendem a flutuar na superfície e os componentes de maior densidade tendem a afundar (VEIT, 2005; PORMIN, 2008; GERBASE; OLIVEIRA, 2012).

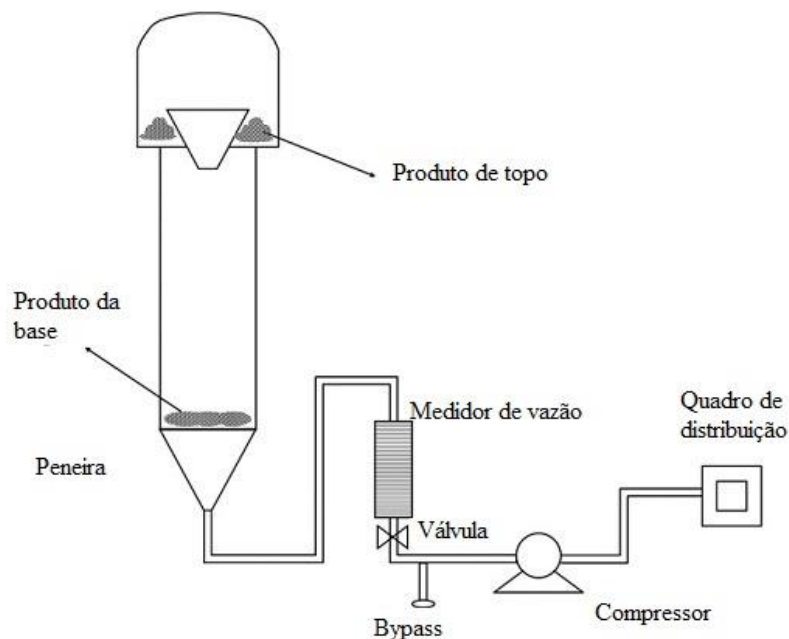
Fazem parte da separação gravimétrica, entre outros processos, a utilização de líquidos densos e suspensões, a elutrição e o separador por fluxo em zigue-zague (ESWARIAH et al., 2008).

A separação pela utilização de líquidos densos envolve o uso de líquidos de alta densidade relativa. Essa técnica é usada para separar partículas sólidas por meio da diferença de densidade. As partículas a serem separadas são imersas em um líquido que tem um valor de densidade entre os valores de densidade dos dois componentes que se pretende separar. As partículas mais pesadas vão para o fundo enquanto as partículas mais leves flutuam na superfície (RON; PENEV, 1995).

Já na separação através do uso de suspensões, o processo é baseado na diferença de densidades entre dois produtos que se deseja obter, os quais são colocados em um líquido ou polpa com densidade intermediária, sendo que um destes produtos afunda, formando o chamado produto afundado, e outro flutua, o qual é chamado produto flutuante (KASPER, 2011).

A técnica consiste, basicamente, na formação de uma polpa, formada por uma mistura de água e um sólido finamente moído, com densidade intermediária entre os produtos que se deseja separar. Assim, misturando-se esta polpa com o produto a ser beneficiado, de determinada granulometria, obtém-se um produto flutuante de densidade menor do que a da polpa (VEIT, 2005).

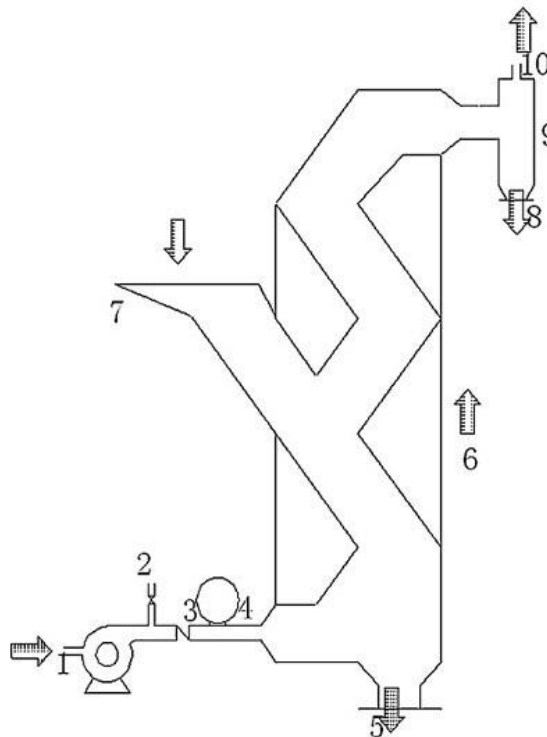
A elutriação é uma importante técnica de separação de partículas sólidas dispersas com base nas diferenças de tamanho e densidade. Seu princípio baseia-se no fato de que as partículas em suspensão em um gás que flui, geralmente ar, se movem para diferentes pontos, sob a influência de diferentes forças, de modo que possam ser separadas uma das outras. Partículas sob a ação da gravidade e arrasto de forças se movem em direções opostas. Partículas pesadas, com velocidade de decantação maior que a velocidade da corrente de ar, se movem para baixo contra o fluxo da corrente de ar, enquanto que as partículas leves com velocidade de decantação menor que a velocidade da corrente de ar são arrastadas para o topo da coluna seguindo o fluxo da corrente de ar como mostra a Figura 8 (SHAPIRO; GALPERIN, 2005; ESWARAI AH et al., 2008).



**Figura 8** – Elutriador (adaptado de MURUGAN et al., 2008).

O processo de separação em zigue-zague é uma técnica também baseada na diferença de gravidade onde é utilizado um dispositivo representado por uma cascata de vários tubos com derivação inclinada em seção retangular disposta de modo a formar um canal em zigue-zague vertical como mostrado na Figura 9. O campo de fluxo de corrente no interior da câmara tem vórtices nos pontos de inclinação, onde as partículas finas são arrastadas, e as partículas grossas chocam-se com a parede oposta e caem. A separação ocorre em um processo de fluxo cruzado, onde o arranjo de tubos, em sequência, permite eliminação múltipla de modo a melhorar a eficiência da separação (SHAPIRO; GALPERIN, 2005).

Embora esta eliminação múltipla melhore a eficiência do processo, partículas grossas atravessam a corrente de ar em cada etapa e se misturam com as partículas finas. Isto impede a separação total, diminuindo a eficiência do processo. Outra desvantagem do dispositivo é sua elevada resistência aerodinâmica com considerável queda de pressão, resultante dos vórtices formados nos pontos de inclinação (SHAPIRO; GALPERIN, 2005).



**Figura 9** – Diagrama esquemático de um separador de fluxo de ar em *zigzag*: (1) soprador, (2) válvula de gaveta, (3) válvula borboleta, (4) Medidor de fluxo de ar, (5) Fração pesada, (6) corrente ascendente, (7) alimentação, (8) fração leve, (9) hidrociclone, (10) ar (adaptado de LONG et al., 2009).

### 3.7.4 Separação magnética

Técnica baseada nos diferentes graus de atração exercidos por um campo magnético sobre os vários compostos metálicos. Quando submetidos a um campo magnético, os metais podem ser divididos nos grupos ferromagnéticos (forte atração), paramagnéticos (média e fraca atração) e diamagnéticos (nenhuma atração). Com a técnica é possível separar uma fração magnética (por exemplo, ferro e níquel) e uma fração não magnética. A fração não

magnética é encaminhada para um separador eletrostático (VEIT, 2001; BRITANNICA, 2014).

Quando um material qualquer é submetido a um campo magnético  $H$ , ele adquire uma intensidade de magnetização  $J$  proporcional ao campo. A constante de proporcionalidade entre  $J$  e  $H$  é denominada susceptibilidade magnética  $K$ . Logo,  $K = J / H$ . A intensidade de magnetização ( $B$ ) dentro de um material sujeito a um campo magnético é dado pela equação 18.

$$B = \mu_0 (H + J) \quad (18)$$

em que  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo.

Em materiais diamagnéticos e paramagnéticos as relações entre  $J$  e  $H$  são aproximadamente lineares, ou seja,  $K$  é constante para um dado material. Materiais diamagnéticos têm um valor negativo muito pequeno para  $K$ , materiais paramagnéticos têm pequena suscetibilidade positiva e materiais ferromagnéticos têm um grande valor, mas variável, dependendo do campo magnético aplicado e da prévia história magnética da amostra (MORAES, 2011).

As propriedades magnéticas de um material são dependentes tanto da estrutura eletrônica dos elementos presentes quanto do arranjo dos átomos no sólido. Essas propriedades magnéticas são conhecidas como propriedades extensivas, ou seja, dependem diretamente da quantidade de cada material presente. Entretanto, as propriedades de partículas compostas dependem do volume fracional de várias fases nas partículas. Os tamanhos, formas e distribuição dos grãos dentro das partículas têm somente uma pequena função na determinação do comportamento desses materiais compostos em um campo magnético (HAYES, 1993).

Em resumo, as características magnéticas do material dependem criticamente de diferentes fatores, tais como, os elementos presentes, seus estados de ionização e suas concentrações no sólido, a estrutura cristalina e, no caso de ferro e ferrimagnéticos, da história anterior do material (HAYES, 1993).

Processos de separação magnética podem ser convencionalmente divididos em alta (>100 Tesla) e baixa (<10 Tesla) intensidade de processo. Baixas intensidades de campo podem ser usadas para selecionar materiais que tenham alta mobilidade magnética de um outro material que tenha baixa suscetibilidade. Os componentes ferromagnéticos de resíduos podem ser separados diretamente através de uma forte região magnética que remove os materiais magnéticos do fluxo (VEIT, 2005).

Um cinturão magnético consiste de uma correia transportadora em volta de um magneto permanente. Os materiais magnéticos são atraídos pelo magneto contra a correia transportadora. A correia transporta o material para fora do campo magnético onde ele se desprende da correia (RON; PENEV, 1995).

Processos com alta intensidade são usados para separar materiais fracamente paramagnéticos (baixo  $K$ ) de partículas presentes em processos a base de um fluxo. Essa técnica pode ser usada para separar materiais paramagnéticos de materiais não magnéticos diretamente do resíduo através de um forte campo magnético com alto gradiente (RON; PENEV, 1995).

### 3.7.5 Separação eletrostática

Processo de concentração de materiais que considera algumas propriedades como a condutividade elétrica, a susceptibilidade em adquirir cargas elétricas superficiais, a forma geométrica e a densidade (LUZ et al., 1995).

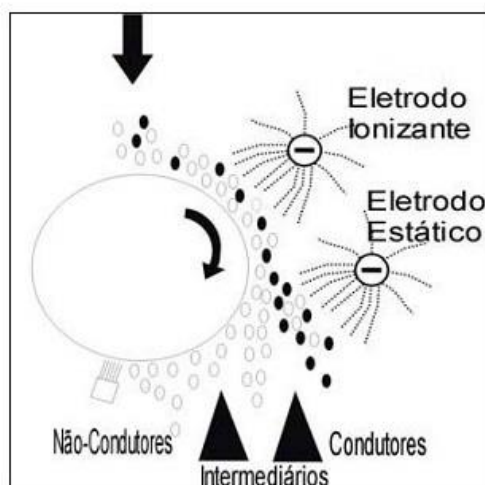
Os fatores que influenciam na separação eletrostática são a intensidade do campo elétrico para ter a capacidade de desviar uma partícula eletricamente carregada e a carga elétrica superficial das partículas (LUZ et al., 1995).

Os resíduos são separados em material condutor e não condutor, contudo ainda pode ser obtida uma fração mista, na qual parte do resíduo condutor e não condutor ficam juntos devido a algum tipo de deficiência na liberação do material (LUZ et al., 2004), (MORAES, 2011).

Quando dois materiais diferentes em contato um com o outro são movidos a parte, uma troca de carga acontece, provavelmente pela transferência de elétrons. Repetidos contatos de partículas que são pobres condutoras elétricas resultam na construção de uma carga “estática”. Apesar de comumente observado, o contato elétrico é difícil de controlar devido à variabilidade de propriedade dos materiais (LUZ et al., 2004).

O mecanismo de indução de condutividade é mais claramente entendido observando-se a Figura 10. Se uma partícula sólida é colocada em um rotor na presença de um campo elétrico, a mesma irá desenvolver carga superficial por indução. Partículas condutoras irão, em um curto espaço de tempo, assumir o potencial do rotor, que é oposto ao do eletrodo sem descarga. As forças eletrostáticas nas partículas condutoras irão atraí-las em direção ao eletrodo. As não condutoras, incapazes de adquirir carga do rotor, permanecem polarizadas e são atraídas pelo rotor ou passam através do campo relativamente intactas (KASPER, 2011).

Na indução de condutividade nenhuma corrente elétrica passa entre o eletrodo e o rotor, já quando ocorre um bombardeamento por íons usando um eletrodo com descarga, ocorre a transferência de carga entre os dois locais. Quando há a aplicação de uma diferença de voltagem muito alta entre o eletrodo e o rotor, moléculas ou átomos carregados podem ser gerados no gás. As partículas passam então através desse fluxo de íons que se movem entre os eletrodos e as cargas são bombardeadas na superfície das partículas (LUZ et al., 2004).



**Figura 10** – Separação de materiais por indução de condutividade (LUZ et al., 2004).



A força atrativa entre as partículas carregadas e o rotor provoca sua permanência junto ao rotor. A diferença no caminho feito pelas partículas torna a separação possível. Além desses mecanismos, existe a técnica chamada *deddy current*, onde pelo uso da condutividade dos materiais, os materiais ferrosos e não-ferrosos podem ser separados ou materiais não-ferrosos podem ser removidos (RON; PENEV, 1995).

Trazendo uma partícula condutora para dentro de um campo magnético flutuante, uma contracorrente é gerada na mesma. A força atuante nesta contracorrente pela variação do campo magnético é usada para separar as partículas. As condutoras são desviadas, enquanto as partículas não condutoras não são desviadas obtendo-se a separação (RON; PENEV, 1995; KASPER, 2011).

A eficiência do processo de separação eletrostática de material oriundo do processamento de PCI aumenta quando se utiliza um equipamento com dois rolos, tipo corona, ao invés deste mesmo equipamento com apenas um rolo (WU, J. et al., 2008; JIANG et al., 2009).

Pode-se utilizar um software de modo a simular a distribuição de campo elétrico, uma vez que as variações dos parâmetros dos eletrodos e a aplicação das tensões influenciam diretamente a distribuição de campo elétrico. Fazendo-se a comparação de resultados simulados e experimentais, otimiza-se os parâmetros operacionais para melhorar os resultados da separação (LI, J., et al., 2008).



## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo foram utilizadas 2,38 kg de PCI de telefones celulares obsoletos que foram coletados a partir de doações de terceiros e lojas de assistência técnica.

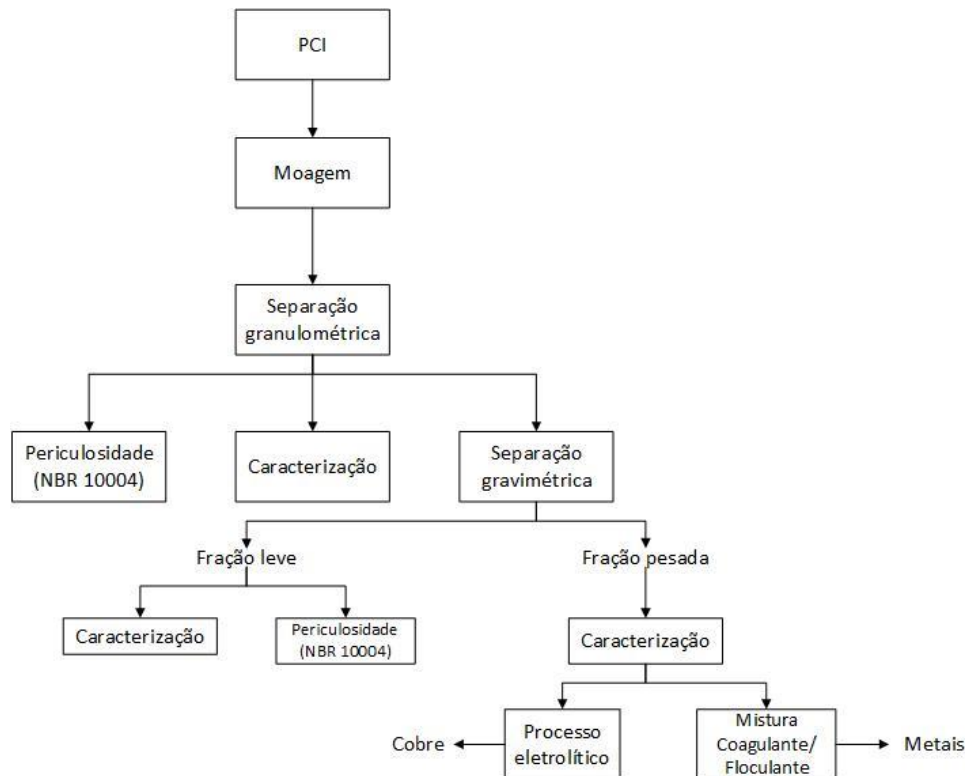
Foram utilizados telefones celulares de marcas, modelos e idades diferentes para tentar se aproximar o máximo possível da realidade encontrada nos resíduos eletroeletrônicos descartados constantemente.

Um aparelho de telefone celular é composto basicamente da PCI, partes metálica e polimérica, tela de cristal líquido e bateria. Após o desmantelamento destes aparelhos, as baterias foram encaminhadas a postos de coleta apropriados, as PCI aproveitadas neste estudo e os demais materiais foram guardados para estudos futuros no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da UFRRJ. A Figura 11 mostra uma PCI obtida por meio do desmantelamento de um aparelho de telefone celular.



**Figura 11** – Placa de circuito impresso de telefone celular.

O processamento destas placas de circuito impresso envolveu várias etapas objetivando reciclar o cobre presente, bem como caracterizar este resíduo quanto sua composição e periculosidade. Foram propostas duas rotas para a obtenção de cobre concentrado: na primeira foi aplicada uma mistura de coagulante e floculante para a precipitação de cobre coloidal. Na segunda, a mesma fração foi levada para o processo eletrolítico para deposição de cobre. O fluxograma proposto para o desenvolvimento deste trabalho está representado na Figura 12.



**Figura 12** – Fluxograma das etapas do processo.

#### 4.1 Processamento Mecânico

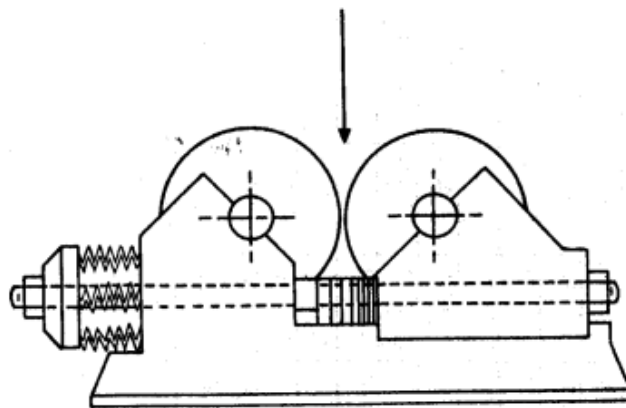
No processamento mecânico das PCI foram envolvidas as operações unitárias de moagem, separação granulométrica e separação gravimétrica.

##### 4.1.1 Moagem

Após o desmantelamento manual da sucata de aparelhos de telefone celular e segregação das placas de circuito impresso, objeto deste trabalho, foi realizada a etapa de moagem. Foi escolhida como primeira etapa do processamento mecânico, pois tem por objetivo principal a liberação dos materiais das PCI, possibilitando, assim, a otimização da reciclagem dos metais.

Este ensaio foi realizado com a cooperação do Programa de Engenharia Mecânica e de Materiais (PEMM) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

Foi realizada uma etapa de pré-moagem, onde as PCI passaram por britador de rolos lisos da marca DENVER 10” x 6”, mostrado na Figura 13, com o objetivo de retirar as arestas metálicas e por uma picotadeira ou guilhotina onde tinham suas dimensões reduzidas ao formato de tiras. Esta pré-moagem teve o objetivo de facilitar o processo de moagem.



**Figura 13** – Britador de rolos lisos (Fonte: FIGUEIRA *et al.*, 2004).

Com o objetivo de obter frações com diâmetro máximo ( $d_{\max}$ ) de 1 mm, a moagem foi realizada em um moinho de facas da marca M.S. MISTURA com 4 lâminas e potência de 2 cv conforme mostra a Figura 14.



**Figura 14** – Moinho de facas.

A perda física de material moído foi calculada pela equação 19.

$$P_f (\%) = |m_m - m_d| \times \frac{100}{m_d} \quad (19)$$

em que:

$m_m$  – massa do material obtido com o processo de moagem

$m_d$  – massa PCI obtida com o desmantelamento dos aparelhos de telefones celulares

$P_f$  – perda física do processo de moagem

#### 4.1.2 Separação granulométrica

Este ensaio foi realizado no Laboratório de Tecnologia (LABTEC) do Departamento de Arquitetura e Urbanismo (DAU) da UFRRJ.

O material proveniente do moinho de facas foi encaminhado à separação granulométrica, onde foi utilizado o separador com peneiras vibratórias da marca VIATEST e as malhas de 1,18 mm, 0,85 mm e 0,30 mm, conforme mostrado na Figura 15.



**Figura 15** – Separador granulométrico.

Cada ensaio consistiu em utilizar 400 g de material sob agitação de 10 min. Após este período, o separador era desligado e as massas retidas pesadas. O objetivo foi obter, ao fim do ensaio, três frações abaixo demonstradas.

- F1:  $d < 0,30 \text{ mm}$ ;
- F2:  $0,30 < d < 0,85 \text{ mm}$ ;
- F3:  $0,85 < d < 1,15 \text{ mm}$ .

A equação 20 foi utilizada para o cálculo da fração percentual retida que representa a massa retida em relação à massa total.

$$\%m_r = m_r \times \frac{100}{m_t} \quad (20)$$

em que:

$m_r$  – massa da amostra retida

$m_t$  – massa total das três frações

Esta perda foi calculada pela equação 21 e pode ter sido causada pelo pequeno diâmetro da fração F1, o que faz com que as partículas desta fração, por terem baixo peso, sejam mais susceptíveis à perda pelo ar.

$$P_f (\%) = \left| m_{moa} - m_{fra} \right| \times \frac{100}{m_{moa}} \quad (21)$$

em que:

$m_{moa}$  – massa material oriundo processo de moagem

$m_{fra}$  – massa total das três frações obtidas na separação granulométrica

#### 4.1.3 Separação gravimétrica

Este ensaio foi realizado no Laboratório de Monitoramento Ambiental I – Água e Efluentes do Departamento de Engenharia da UFRRJ.

Após as PCI terem sido moídas e separadas granulometricamente, foi feita a separação por densidade utilizando líquidos orgânicos de acordo com algumas metodologias já empregadas (BERNARDES, 2009). O líquido utilizado foi o Tetrabromoetano (TBE), densidade igual a 2,96 g/cm<sup>3</sup>, que proporcionou um valor de densidade intermediário entre os materiais metálicos e não-metálicos.

A densidade de trabalho escolhida foi de 2,5 g/cm<sup>3</sup> por oferecer menor viscosidade, tornando assim o processo de separação mais rápido e também facilitar o processo de limpeza do TBE através de filtragem mais eficiente e rápida. Para diminuir a densidade de 2,96 para 2,5 g/cm<sup>3</sup> foi usada a acetona na proporção de 1:0,27. O cálculo dos volumes foi realizado através da equação 22 (ZHANG; FORSSBERG, 1997; AQUINO et al., 2007).

$$V_2 = V_1 \times \frac{d_1 - d}{d - d_2} \quad (22)$$

em que:

$d$  – densidade de trabalho (g/cm<sup>3</sup>);

$d_1$  – densidade TBE (g/cm<sup>3</sup>);

$V_1$  – volume TBE (cm<sup>3</sup>);

$d_2$  – densidade acetona (g/cm<sup>3</sup>);

$V_2$  – volume acetona ( $\text{cm}^3$ ).

A Tabela 6 apresenta valores de densidade de vários materiais encontrados em uma PCI, onde pode-se observar que a densidade de trabalho escolhida tem um valor intermediário entre as densidades dos materiais metálicos e não-metálicos.

**Tabela 6** – Densidade de vários materiais presentes nas PCI (adaptado de SPEIGHT, 2005).

<b>Material</b>	<b>Densidade (<math>\text{g}/\text{cm}^3</math>)</b>	<b>Material</b>	<b>Densidade (<math>\text{g}/\text{cm}^3</math>)</b>
Ouro	19,3	Alumina	3,99
Chumbo	11,3	Vidro	2,24
Prata	10,5	Teflon	2,2
Cobre	8,9	Magnésio	1,7
Ferro	7,9	PVC	1,7
Estanho	7,31	Sílica	1,7 – 2,2
Zinco	7,14	Policarbonato	1,2

O TBE com a densidade de trabalho de  $2,5 \text{ g}/\text{cm}^3$  foi colocado em um funil de separação de 500 mL conforme mostrado na Figura 16. Com o objetivo de obter maior quantidade de massa foram realizados dois ensaios, consistindo cada um de 20 g de amostra de cada uma das três frações. Após 2 horas, em média, a separação estava completa, ou seja, o material cuja densidade é maior que a do líquido afundava e o material leve flutuava. O material que afunda é, em tese, concentrado em material metálico e o que flutua concentrado em material não-metálico (polímeros e cerâmicos).



**Figura 16** – Funil de separação.



A separação da parte pesada e da parte leve foi realizada utilizando-se uma malha de aço que foi colocada na saída do funil de separação e que permitia a passagem do TBE mas retinha o material sólido, primeiramente da fração pesada e em outra etapa da fração leve. Em seguida, esse material foi seco e pesado.

## **4.2 Caracterização das Placas de Circuito Impresso Quanto à Periculosidade**

A entrada em vigor na União Europeia, em 2006, da Diretriz RoHS propôs a restrição ao uso de algumas substâncias perigosas na fabricação de produtos eletroeletrônicos, entre elas o chumbo e o cádmio. Logo, a tendência é que estas substâncias sejam substituídas ou tenham suas quantidades reduzidas na fabricação destes equipamentos também no Brasil, por isso, neste ensaio a atenção foi focada nestes elementos.

Este ensaio foi realizado no Laboratório de Monitoramento Ambiental I – Água e Efluentes do Departamento de Engenharia da UFRRJ. A periculosidade das amostras de PCI foi avaliada por meio dos extratos lixiviados das mesmas, onde foram analisadas as concentrações de cádmio e chumbo através da técnica de Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES) sendo os resultados comparados aos valores preconizados pela norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR) 10004 que classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente.

Este ensaio foi realizado nas amostras provenientes da separação granulométrica com o objetivo de verificar a periculosidade da amostra original. Foi também realizado nas frações leves oriundas da separação gravimétrica uma vez que sendo, em tese, menos concentradas em metais são consideradas resíduos do processo e devem ser classificadas quanto à periculosidade para que sejam descartadas corretamente.

A obtenção do extrato lixiviado das amostras foi baseado na ABNT NBR 10005 que fixa os requisitos exigíveis para a obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, visando diferenciar os resíduos classificados pela ABNT NBR 10004 como classe I – perigosos - e classe II – não perigosos.

### **4.2.1 Ensaios preliminares**

Foram realizados alguns ensaios com as amostras oriundas da granulometria e gravimetria para se determinar qual a solução extratora que será utilizada na obtenção dos lixiviados conforme preconizado pela norma ABNT NBR 10005.

O ensaio consistiu em se colocar 5 g de amostra em um béquer, em seguida a adição de 96,5 mL de água deionizada e agitar vigorosamente por 5 min. Decorrido este tempo, verificou-se o pH da solução.

Se o pH for menor ou igual a 5,0 utiliza-se a solução de extração nº 1 descrita na mesma norma. Se for maior que 5,0 adiciona-se 3,5 mL de HCl 1 mol/L, homogeniza-se a solução e aquece a 50 °C durante 10 min. Após, deve-se esfriar a solução e verificar novamente o pH. Se o pH for menor ou igual a 5,0, utiliza-se a solução de extração nº 1 e se for maior 5,0 utiliza-se a solução de extração nº 2.

#### 4.2.2 Solução extratora

Solução de extração nº 1: adição de 5,7 mL de ácido acético glacial em água deionizada, seguida da adição de 64,3 mL de hidróxido de sódio (NaOH) 1,0 mol/L, completando o volume a 1 L. O pH desta solução deve ser  $4,93 \pm 0,05$ ;

Solução de extração nº 2: adição de 5,7 mL de ácido acético glacial em água deionizada completando o volume de 1 L. O pH desta solução deve ser  $2,88 \pm 0,05$ .

#### 4.2.3 Obtenção do extrato lixiviado

Não foi feito nenhum tipo de classificação dos telefones celulares objetivando dar um retrato mais fiel do que é encontrado em grande parte dos REE.

Após o desmantelamento dos aparelhos de telefones celulares para o isolamento das PCI, as mesmas foram submetidas ao processo de moagem em moinho de facas objetivando um diâmetro máximo de 1 mm. Em seguida, as PCI foram submetidas à separação granulométrica com o objetivo de obter três frações. Em cada uma destas três frações foi realizado ensaio preliminar, de acordo com a norma ABNT NBR 10005, para determinação da solução extratora a ser utilizada no ensaio de lixiviação.

Após os ensaios preliminares, uma determinada quantidade de amostra de cada fração de material (previamente homogeneizado) foi transferida para um recipiente. Foi acrescentada a solução extratora com volume proporcional a 20 vezes a massa da amostra. O recipiente foi mantido sob agitação constante durante  $(18 \pm 2)$  horas, à temperatura de até  $25^{\circ}\text{C}$  com uma velocidade de  $(30 \pm 2)$  rpm em um agitador rotativo da marca FISATOM, modelo 803, mostrado na Figura 17.



**Figura 17** – Agitador rotativo.

Após este tempo de  $(18 \pm 2)$  horas, foi realizada a filtração e o lixiviado encaminhado à análise química. Os elementos cádmio e chumbo foram determinados através da técnica de ICP-OES realizada no Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) no Rio de Janeiro.

### 4.3 Caracterização das Placas de Circuito Impresso Quanto à Composição

#### 4.3.1 Digestão em água régia

Este ensaio foi realizado no Laboratório de Monitoramento Ambiental I – Água e Efluentes do Departamento de Engenharia da UFRRJ. A caracterização das PCI foi realizada com o objetivo de se verificar a tendência de concentração dos metais em cada uma das frações oriundas da separação granulométrica, bem como em cada uma das frações leve e pesada obtidas com a separação gravimétrica.

Este ensaio se deu por meio da digestão em água-régia (25 % ácido nítrico/ 75 % ácido clorídrico), pois estudos anteriores demonstraram a alta eficiência deste agente para a solubilização de vários metais (LEE et al., 1997).

Os ensaios de digestão foram realizados obedecendo-se à relação sólido/líquido (S/L) de 1/20. Utilizou-se neste ensaio uma amostra de aproximadamente 10 g de cada uma das frações das PCI moídas e 2 g de cada uma das frações leve e pesada oriundas da separação gravimétrica (PARK; FRAY, 2009; YAMANE et al., 2011).

Ao término da lixiviação, foi realizada a filtração e o extrato lixiviado, mostrado na Figura 18, foi encaminhado para análise química. O filtrado, mostrado na Figura 19, foi seco em estufa a 60°C por 24 h e pesado.



**Figura 18** – Lixiviados oriundos separação da granulométrica.



**Figura 19** – Filtrado, visto de cima, de uma das frações oriundas da separação granulométrica.

A análise química do extrato lixiviado foi realizada por meio da técnica de ICP-OES, também foi realizada no CETEM no Rio de Janeiro. Foram pesquisados os elementos alumínio, ouro, prata, cobre, ferro, níquel, chumbo, estanho e zinco.

#### 4.3.2 Difração em raios X (DRx)

Foi utilizado o método do pó, onde cada uma das três amostras foi uniformizada e colocada no suporte do equipamento. O equipamento utilizado foi um Difratorômetro da marca RIGAKU Miniflex II mostrado na Figura 20. As condições de realização dos ensaios foram 30 kV de alta tensão e 15 A de corrente de filamento. A varredura foi feita com gama angular ( $2\theta$ ) 30-60, incremento de  $0,08^\circ$ , tempo de aquisição de dois segundos e o modo utilizado foi por degraus. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Catálise do Departamento de Engenharia Química da UFRRJ.



**Figura 20** – Difratorômetro RIGAKU.

#### 4.3.3 Fluorescência de raios X (FRx)

Esta análise foi realizada por meio da parceria com a Fábrica Carioca de Catalisadores (FCC) no Rio de Janeiro, onde uma pequena quantidade de cada uma das frações oriundas do processo de separação granulométrica foi analisada com o objetivo de estimar as quantidades dos principais metais presentes nas PCI.

#### 4.4 Remoção de Metais por Precipitação

Este ensaio foi realizado no Laboratório de Monitoramento Ambiental I – Água e Efluentes do Departamento de Engenharia da UFRRJ. Neste estudo, foram utilizados o polieletrólito catiônico IFloc 521 BT (coagulante) e o polieletrólito aniônico IFloc 101 (floculante) fornecidos pela empresa IWT Água e Efluentes.

O IFloc 521 BT é um polieletrólito de alta carga catiônica fornecido na forma líquida e aprovado pelo Departamento *Drinking Water Inspectorate* do Reino Unido, como seguro para o tratamento de água potável, com a dosagem máxima de 10 mg/L. O IFloc 101 é um floculante de poliácridamida aniônico com carga aniônica média, de massa molar ultra elevada fornecido na forma de um pó granular. É completamente solúvel em água, produzindo soluções de alta viscosidade. As demais informações sobre o IFloc 521 BT e IFloc 101 estão disponíveis no Anexo 1.

Os coloides possuem propriedades elétricas que criam força de repulsão que impede a aglomeração e a sedimentação. O coagulante desestabiliza as partículas coloidais permitindo as colisões entre as mesmas e a conseqüente formação dos flocos. Já o floculante acentua o processo de formação dos flocos (METCALF; EDDY, 2003).

Foi testada uma amostra proveniente de uma das frações oriundas da separação gravimétrica que possui maior concentração em metais conforme indicado pela análise química do lixiviado obtido do processo de caracterização. Utilizou-se 2,0 g de amostra que foi lixiviada em água régia até a ebulição por 10 minutos. Depois de resfriado, o sistema foi filtrado e o lixiviado encaminhado para os testes.

O lixiviado obtido sofreu uma série de diluições e a solução resultante foi separada em seis porções diferentes, sendo que cada uma recebeu uma mistura com diferentes proporções de coagulante e floculante conforme mostradas na Tabela 8 e o pH de todas foi corrigido para 9,0. Estas amostras foram submetidas ao teste dos jarros através de um *Jar-test*. Ao fim do experimento, as amostras foram filtradas. Coletou-se uma pequena quantidade de cada amostra que foram enviadas à análise química para pesquisa dos metais alumínio, ouro, prata, cobre, ferro, níquel, chumbo, estanho e zinco. O resultado desta análise química foi comparado ao obtido na caracterização da amostra original para que se avalie a melhor dosagem na remoção de uma maior quantidade de metais.

A Tabela 7 apresenta a quantidade de coagulante e floculante em cada uma das misturas de acordo com a indicação do fornecedor.

**Tabela 7** – Misturas utilizadas de coagulante e floculante.

Mistura	Volumes (mL) IFloc 521 BT (coagulante)	Dosagem (mg/L) IFloc 101 (floculante)
A	1,5	0,5
B	1,5	1,0
C	1,5	2,0
D	1,5	3,0
E	1,5	4,0
F	1,5	5,0

O percentual de remoção dos metais foi calculado pela equação 23.

$$\text{Remoção(\%)} = \frac{C_{\text{inicial}} - C_{\text{residual}}}{C_{\text{inicial}}} \times 100 \quad (23)$$

em que:

$C_{\text{inicial}}$  – concentração inicial da solução (mg/L)

$C_{\text{residual}}$  – concentração dos metais na solução após remoção (mg/L)

## 4.5 Recuperação Eletrolítica de Cobre das Placas de Circuito Impresso

### 4.5.1 Preparo do eletrólito

O eletrólito utilizado no ensaio de eletro-obtenção do cobre foi obtido pela dissolução de uma determinada massa de amostra em água régia, obedecendo a relação sólido/líquido de 1/20. A amostra é proveniente de uma das frações da separação gravimétrica mais concentrada em metais conforme mostrado pela análise química do lixiviado obtido na caracterização. A solução foi aquecida até a ebulição por 10 min para dissolução do material. Após o resfriamento do sistema, promoveu-se a filtração para retenção das impurezas. O volume da solução foi elevado a 1 L com água destilada, tendo o pH ajustado na faixa de 6,0 a 7,0 para evitar dissolução da chapa de cobre utilizada como um dos eletrodos. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Monitoramento Ambiental I – Água e Efluentes do Departamento de Engenharia da UFRRJ.

### 4.5.2 Recuperação eletrolítica do cobre

A reciclagem do cobre foi avaliada por meio de processo eletrolítico, onde se verificou a diminuição da concentração de cobre no eletrólito ao longo do tempo. Para este ensaio foi montada uma célula composta por um catodo de cobre e aço inoxidável como anodo.

Este ensaio foi realizado no Laboratório de Controle Ambiental do Departamento de Engenharia Química da UFRRJ.

Neste ensaio variou-se o tempo de deposição. Nos intervalos de tempo 0, 20, 40 e 60 min, o teor de cobre era avaliado por meio da retirada de uma amostra que foi encaminhada à análise química pela técnica de ICP-OES.

As condições utilizadas foram:

- Área superficial dos eletrodos - aproximadamente 18 cm<sup>2</sup>;
- Temperatura ambiente (em torno de 25°C);
- Tensão: 5,2 V;
- Corrente: 1,1 A.

O percentual de recuperação de cobre foi calculado por meio da equação 24.

$$\text{Remoção}(\%) = \frac{C_{\text{inicial}} - C_{\text{residual}}}{C_{\text{inicial}}} \times 100 \quad (24)$$

em que:

$C_{\text{inicial}}$  – concentração inicial da solução (mg/L)

$C_{\text{residual}}$  – concentração dos metais na solução após remoção (mg/L)

O pH teórico para precipitar o cobre em forma de hidróxido é próximo de 8.2 (TORRES; GAMA, 2005), mas é suficiente com um pH de 7.0. O cobre pode precipitar em forma de carboneto ou hidróxido, mediante o processo químico para precipitação de hidróxido de cobre descrito pela equação 25.







## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Moagem

A Tabela 8 apresenta a massa das PCI obtida pelo desmantelamento dos aparelhos de telefones celulares e que foram encaminhadas ao processo de moagem e a massa obtida.

**Tabela 8** – Massas obtidas pelos processos de desmantelamento e moagem das PCI.

Processo	Massa (kg)
Desmantelamento	2,38
Moagem	2,28
Perda física	4,08 %

A perda física de material foi causada pelo fato de o moinho de facas utilizado comportar pequeno volume de material a cada seção de moagem. Como foram necessárias várias seções para moagem de todo o material, houve considerável perda física de material devido ao ato de abrir e fechar várias vezes o compartimento do moinho.

### 5.2 Separação Granulométrica

O material oriundo do processo de moagem foi separado em três frações (F1, F2 e F3) através do separador granulométrico. As peneiras disponíveis tinham diâmetro de abertura de 300  $\mu\text{m}$  (0,3 mm), 850  $\mu\text{m}$  (0,85 mm) e 1150  $\mu\text{m}$  (1,15 mm).

Os resultados obtidos após o ensaio de separação granulométrica estão representados na Tabela 9. A massa retida corresponde às massas das partículas que possuem diâmetro maior que a abertura da malha da peneira.

**Tabela 9** – Massa das frações obtidas através da separação granulométrica.

Frações	d (mm)	m <sub>r</sub> (kg)	% retido
F1	d < 0,30	0,23	10,95
F2	0,30 < d < 0,85	1,72	81,90
F3	0,85 < d < 1,15	0,15	7,14
m total		2,10	

Houve perda física de 0,18 kg (2,28-2,10) em relação ao material oriundo do processo de moagem, que representa o valor de 7,78% que foi causada, possivelmente, pelo pequeno diâmetro da fração F1, o que faz com que as partículas desta fração, por terem baixo peso, sejam mais susceptíveis à perda pelo ar.

Observa-se que o material moído se concentrou na fração F2. Este resultado está dentro do esperado, uma vez que as PCI são materiais de difícil moagem, devido ao seu elevado conteúdo metálico, o que torna difícil a obtenção de maiores quantidades nas menores frações. Caso fosse utilizada uma peneira com diâmetro um pouco menor que 850  $\mu\text{m}$ , a distribuição da massa retida seria um pouco mais uniforme com uma quantidade maior de massa retida na fração F3.

### 5.3 Separação Gravimétrica

A Tabela 10 apresenta a quantidade total de material que afundou e que flutuou ao fim dos ensaios. Foram utilizadas, no total, 40 g de material de cada fração por ensaio.

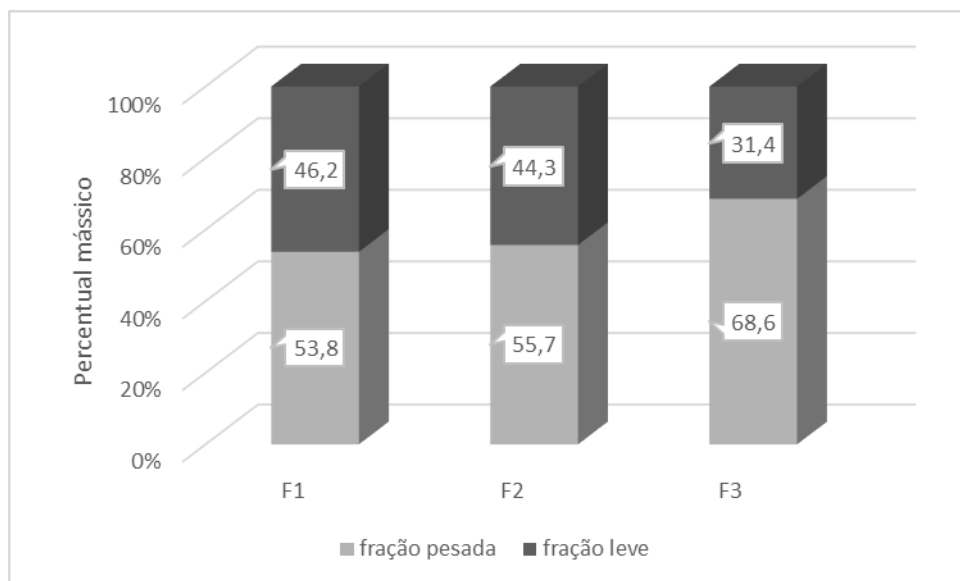
**Tabela 10** – Massas obtidas pela separação gravimétrica.

	<b>Massa fração leve (g)</b>	<b>Massa fração pesada (g)</b>	<b>Perda (g)</b>	<b>Perda (%)</b>
F1	9,38	10,94	19,68	49,21
F2	15,85	19,92	4,23	10,59
F3	12,45	27,21	0,35	0,87

Uma vez que os metais são materiais de difícil moagem, presume-se que as frações com maiores diâmetros sejam mais ricas em materiais metálicos que possuem densidade maior que a do líquido extrator. Devido a isso, considera-se que as frações pesadas são mais concentradas em material metálico e que a massa do material que afundou aumente com o aumento do diâmetro da fração, o que se observou com os dados mostrados Figura 21.

No processo de separação da fração mais fina (F1) houve grande perda de material que se deu pelo fato de parte da fração fina ter diâmetro menor que o da malha de aço utilizada no ensaio, ocasionando uma menor retenção.

Conhecendo-se a composição de uma PCI, considera-se que a maior parte do material que transpassou a malha de aço utilizada no ensaio é composta de material não-metálico o qual tem densidade menor que a do líquido extrator. Isto se deve ao fato de quando uma PCI é submetida ao processo de moagem, o material não-metálico, mais frágil, se concentra nas frações com menores diâmetros. Logo, se não houvesse esta grande perda de material, o percentual de massa que flutuou seria maior.



**Figura 21** – Percentuais de massa que afundaram e flutuaram na separação gravimétrica.

O material de interesse é o que afundou, pois se considera que seja rico em metais. A fração que flutuou (leve) é resíduo do processo e deve ser submetida ao ensaio de periculosidade para se definir a melhor forma para seu descarte.

A caracterização por lixiviação em água régia é realizada para verificar o como os metais se concentram ao longo das frações. As frações que afundaram foram submetidas a ensaios de caracterização por digestão em água régia. Já as frações que não afundaram passaram por ensaios de periculosidade e caracterização também por digestão em água régia.

#### 5.4 Caracterização das Placas de Circuito Impresso Quanto à Periculosidade

Os ensaios preliminares indicaram o uso da solução nº 1 a ser usada neste ensaio de periculosidade de cada uma das três frações oriundas da separação granulométrica. O valor do pH obtido das três soluções extratoras preparadas se encontrou dentro da faixa necessária de  $4,93 \pm 0,05$ .

Os resultados das análises químicas para determinação de cádmio e chumbo presentes nos extratos lixiviados de cada uma das três frações oriundas da separação granulométrica estão representados na Tabela 11, onde também são apresentados os valores máximos permitido pela norma ABNT 10004. Esta norma classifica os resíduos sólidos em perigosos ou não perigosos para os extratos obtidos no ensaio de lixiviação utilizando os procedimentos previstos pela norma ABNT 10005.

**Tabela 11** – Concentração (mg/L) nos lixiviados oriundos da separação granulométrica.

	F1	F2	F3	ABNT 10004
Cádmio	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,5
Chumbo	227	259	65,6	1,0

Neste ensaio foi detectada uma quantidade de chumbo muito superior aos limites máximos estabelecidos na norma ABNT 10004 o que confirma a periculosidade ao meio ambiente e reforça a necessidade do tratamento cuidadoso deste tipo de resíduo.

As análises realizadas detectaram uma quantidade muito pequena de cádmio nos extratos lixiviados. As quantidades de chumbo e cádmio detectadas nesta análise não significam que sejam estas as quantidades de chumbo e cádmio presentes nos aparelhos, mas apenas o que o lixiviante empregado, e que simula uma exposição direta das sucatas ao meio ambiente em um aterro ou lixão, é capaz de lixiviar no tempo de duração do ensaio.

Já nas frações leves oriundas da separação gravimétrica, os ensaios preliminares também indicaram o uso da solução nº 1 a ser utilizada neste ensaio de periculosidade. O valor do pH obtido das três soluções extratoras preparadas também se encontrou dentro da faixa necessária de  $4,93 \pm 0,05$ .

Os resultados das análises químicas para determinação de cádmio e chumbo presentes nos extratos lixiviados de cada uma das três frações leves oriundas da separação gravimétrica estão representados na Tabela 12, onde também são apresentados os valores máximos permitidos pela norma ABNT 10004.

**Tabela 12** – Concentração (mg/L) nos lixiviados das frações leves oriundas da separação gravimétrica.

	<b>F1</b>	<b>F2</b>	<b>F3</b>	<b>ABNT 10004</b>
Cádmio	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,5
Chumbo	6,3	3,8	2,0	1,0

As análises realizadas detectaram uma quantidade muito pequena de cádmio e a quantidade de chumbo observada também é superior aos limites máximos estabelecidos na norma ABNT NBR 10004. Conclui-se que a maior parte do chumbo originalmente presente se concentrou na fração pesada oriunda da separação gravimétrica, o que já valida, de certo modo, este método como concentrador de metais. Mesmo com uma quantidade bem menor de chumbo, os valores ainda se encontram acima do permitido pela norma ABNT 10004. Logo, é necessário um tratamento neste resíduo antes de seu descarte no meio ambiente.

## **5.5 Caracterização das Frações Oriundas da Separação Granulométrica Quanto à Composição**

### **5.5.1 Lixiviação em água régia**

Neste ensaio foi considerado material não-metálico (polímeros e cerâmicos) o que não foi lixiviado por água régia. Este material foi separado através de filtração, seco em estufa a 60 °C por 24 horas e pesado. Foram obtidas as seguintes massas de material filtrado para cada uma das frações:

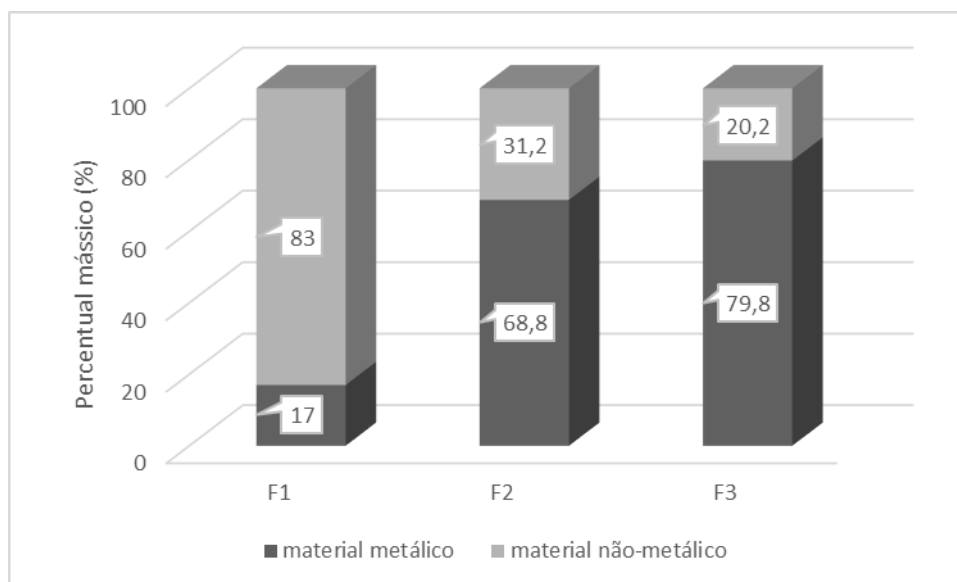
- F1 – 8,302 g;
- F2 – 3,125 g;
- F3 – 2,017 g.

Considerando a massa inicial de 10 g, a Tabela 13 apresenta o percentual de materiais metálico e não-metálico em cada uma das frações oriundas da separação granulométrica.

**Tabela 13** – Percentuais de materiais metálico e não-metálico.

	Metálico (%)	Não-metálico (%)
F1	17,0	83,0
F2	68,8	31,2
F3	79,8	20,2

Conforme observado pela Figura 22, o percentual de material metálico aumentou com o aumento da granulometria da amostra. A presença de metais nas PCI as torna materiais de difícil moagem, o que explica, de certo modo, a maior concentração de material metálico nas frações mais grosseiras. Os materiais não-metálicos, mais frágeis, atingem diâmetros menores, se concentrando nas frações mais finas.



**Figura 22** – Percentuais dos materiais metálicos e não-metálicos das frações oriundas da separação granulométrica.

Vale destacar que a moagem seguida de separação granulométrica foi suficiente para concentrar quase 80% do material metálico na fração mais grosseira.

Após o ensaio de lixiviação, o sistema foi filtrado e o material lixiviado encaminhado à análise química onde foi feita a pesquisa dos metais alumínio, ouro, prata, cobre, ferro, níquel, chumbo, estanho e zinco. O resultado desta análise está mostrado na Tabela 14.

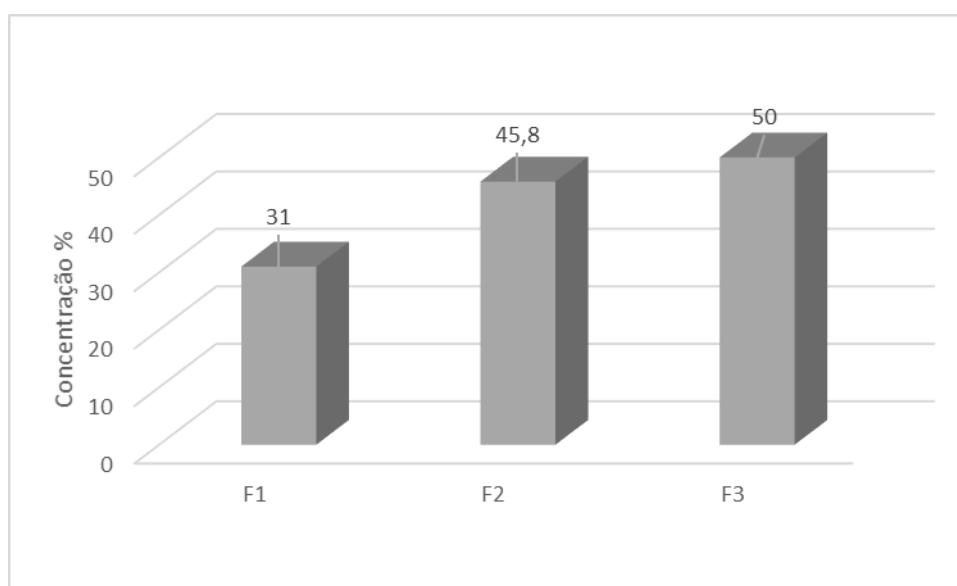
**Tabela 14** – Concentração (%) dos metais presentes nas frações oriundas da separação granulométrica.

	Al	Au	Ag	Cu	Fe	Ni	Pb	Sn	Zn
F1	0,59	0,08	0,21	31,0	0,75	1,25	0,73	3,4	0,19
F2	1,14	0,08	0,16	45,8	1,07	1,55	0,73	4,4	0,34
F3	0,61	0,10	0,02	50,0	0,71	1,04	0,25	1,67	0,51

Os resultados mostrados na Tabela 14 indicam quantidades de cobre bem superiores aos demais elementos. Em virtude de seu alto valor, a presença, embora pequena, de metais preciosos (ouro e prata) torna a reciclagem destes resíduos economicamente muito interessante. A moagem, seguida da separação granulométrica, concentrou até 50% de cobre na fração mais grosseira. Além disso, a presença de chumbo, que é um metal traço, torna o processo de reciclagem necessário para proteção ao ambiente.

A caracterização das frações oriundas da separação granulométrica não mostrou um padrão de comportamento para os elementos nos três diferentes tamanhos das frações. A construção de um padrão depende de quão liberados estão os metais.

A Figura 23 mostra os percentuais do elemento cobre nas três frações oriundas da separação granulométrica. Observa-se que sua concentração aumenta nas frações mais grosseiras.

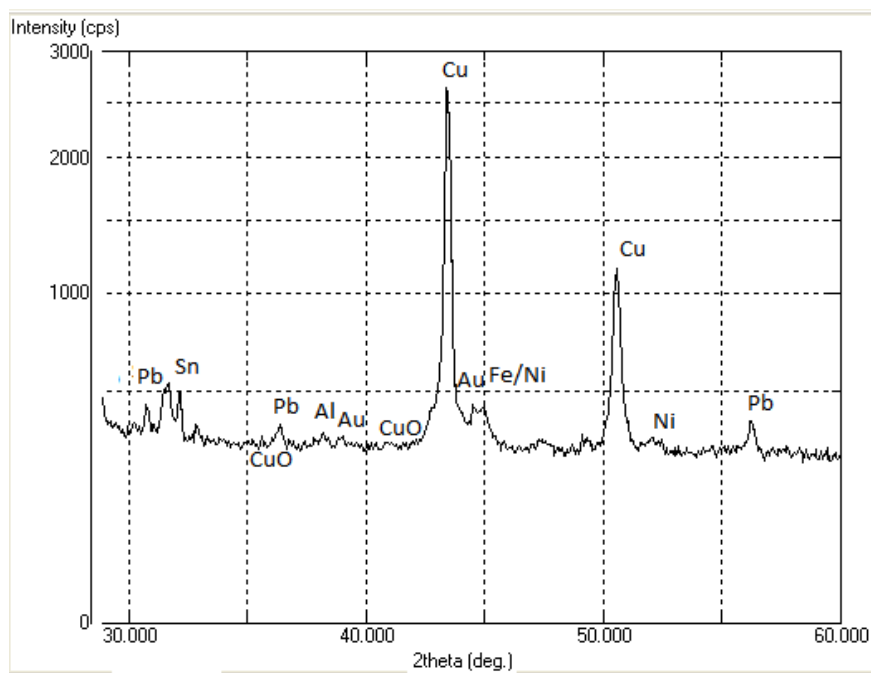


**Figura 23** – Concentrações de cobre nas frações oriundas da separação granulométrica.

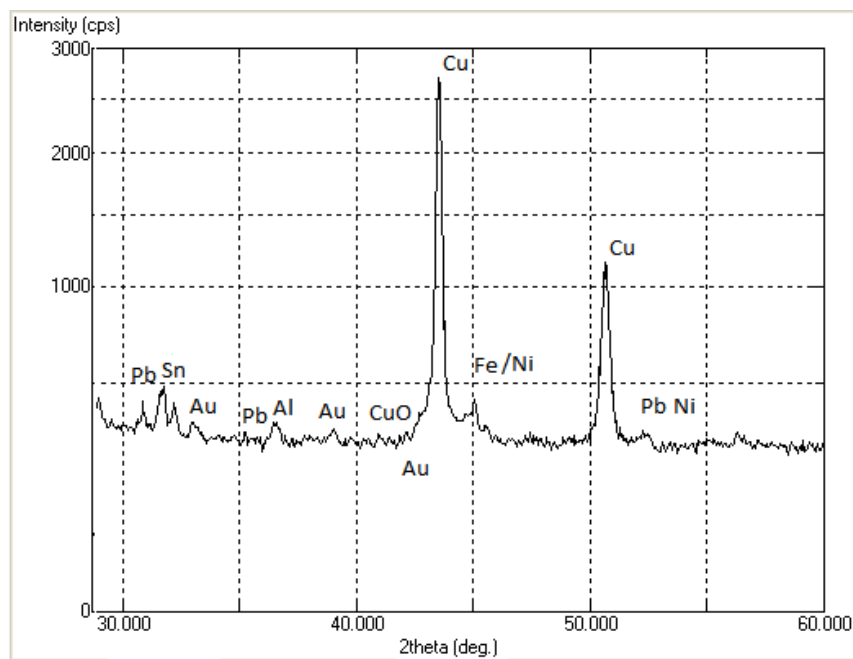
### 5.5.2 Difração de raios X (DRx)

Para a identificação dos picos de difração foi utilizada a base de dados com as fichas de identificação das espécies JCPDS (*Joint Committee on Powder Diffraction Standards*). Os difratogramas analisados neste trabalho foram identificados com base nas fichas JPCPDS 04-836 para identificação do Cu, 04-787 para identificação do Al, 04-850 para identificação do Ni, 06-696 para identificação do Fe, 04-686 para identificação do Pb, 04-784 para identificação do Au e 78-428 para identificação do CuO, constantes no Anexo 2. As Figuras 24, 25 e 26 apresentam os difratogramas correspondentes a cada uma das frações oriundas da separação granulométrica.

As Figuras 24 e 25 apresentam semelhantes picos com mesma intensidade de difração. De acordo com esta análise pode-se dizer que as frações F1 e F2 apresentam semelhanças em sua composição metálica e que o maior diâmetro da fração F2 não foi suficiente para provocar o mascaramento dos metais e impedir a difração dos raios X. O pico de maior intensidade de difração é característico do elemento cobre, o que indica sua presença em maior quantidade nestas duas frações.

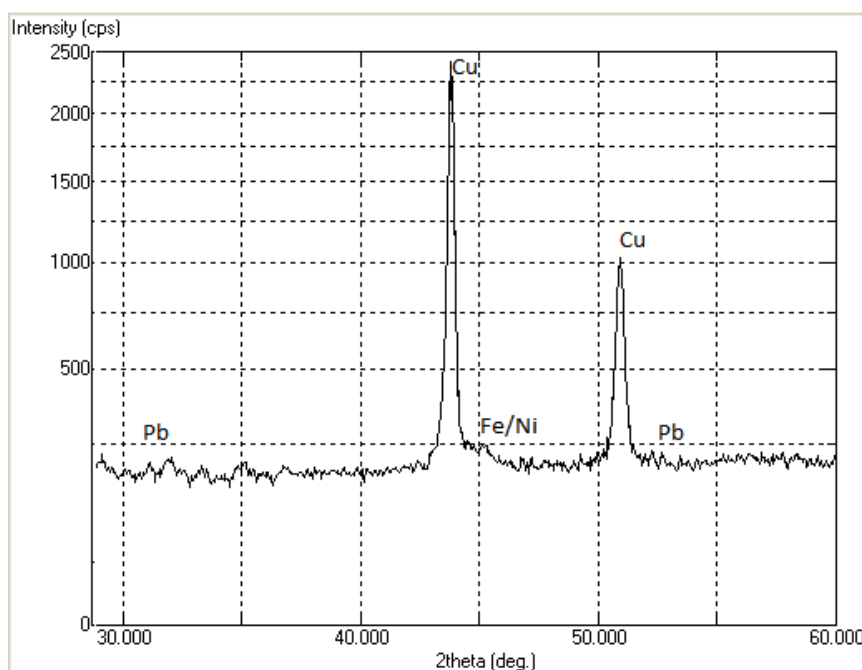


**Figura 24** – Difratograma fração F1 oriunda separação granulométrica.



**Figura 25** – Difratoograma fração F2 oriunda separação granulométrica.

O difratograma representado pela Figura 26 apresenta apenas dois picos bem acentuados de difração característicos do elemento cobre. Mesmo não se observando outros picos característicos de difração, isto não significa que não há outros metais na amostra. Devido ao maior diâmetro das partículas da fração F3, os metais tendem a ficar mascarados pelos materiais não-metálicos não sendo possível a difração característica dos raios X. Esta fração é mais concentrada no elemento cobre.



**Figura 26** – Difratoograma fração F3 oriunda separação granulométrica.



Ao se observar os difratogramas obtidos para as três frações (F1, F2 e F3), verifica-se que os picos de difração das espécies identificadas apresentam intensidade crescente a medida que diminui a granulometria da fração analisada, que pode ser explicada pelo fato de nas partículas maiores haver mascaramento dos metais dificultando a difração dos raios X. Isto explica também a observação de picos de difração somente para o cobre no ensaio com a amostra da fração F3 que possui maior diâmetro.

### 5.5.3 Fluorescência de raios X (FRx)

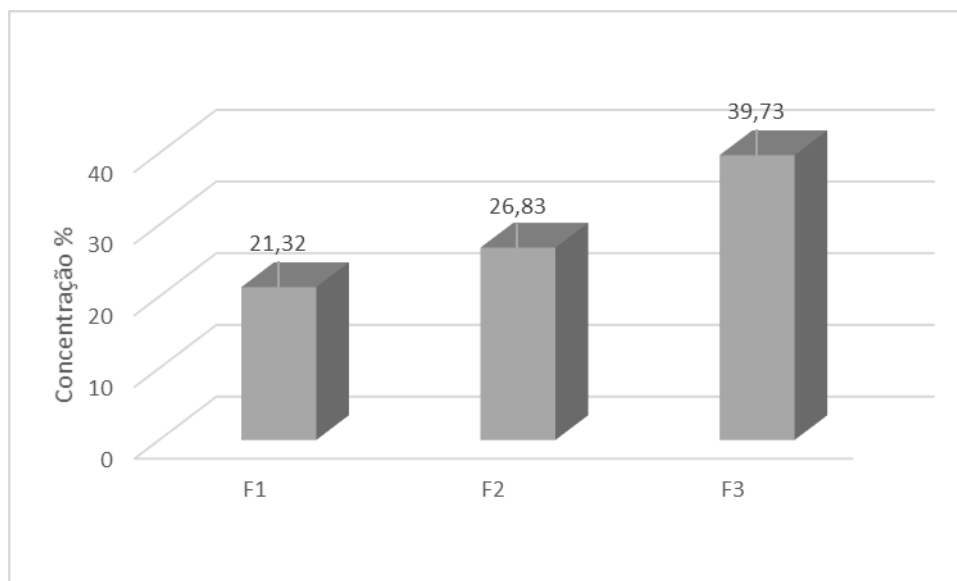
A Tabela 15 apresenta os resultados obtidos para os metais mais relevantes na análise por FRx realizada nas frações oriundas da separação granulométrica.

**Tabela 15** – Concentração (%) dos metais nas frações oriundas da separação granulométrica obtida por FRx.

	F1	F2	F3
Ag	0,28	0,18	ND
Al	12,84	12,21	10,37
Au	0,05	0,07	0,09
Cu	21,32	26,83	39,73
Fe	2,03	1,46	0,54
Ni	1,16	1,19	1,42
Pb	0,57	0,42	0,19
Si	37,62	36,38	31,06
Sn	2,41	1,72	0,69
Zn	0,18	0,16	0,14

Os valores de concentração de cobre mostrados na Tabela 15 revelaram que o mesmo se concentrou na fração mais grossa (F3). O mesmo comportamento foi comprovado para outros metais (Au e Ni). Essa liberação dos metais pode tornar o processo mais atraente nos aspectos econômico e ambiental, viabilizando e tornando o processo sustentável. Não foi observado um padrão de comportamento para os metais ao longo das três frações. Alguns metais (Cu, Ni e Au) apresentaram concentrações percentuais crescentes com a granulometria. Outros metais (Ag, Al, Fe, Pb e Sn) apresentaram tendência oposta. A justificativa pode se encontrar na fonte dos metais nas PCI, alguns estão mais disponíveis para o processo de moagem e outros metais estão menos disponíveis, atuando nos componentes eletrônicos internos dos circuitos. Dessa forma, a liberação dos metais ou dos óxidos metálicos, também é uma função, além do grau de moagem, da ocorrência do metal na PCI.

O metal base cobre apresenta-se em quantidade considerável, que aumenta conforme o aumento do diâmetro da partícula. Isto pode ser melhor observado por meio da Figura 27. Pode-se avaliar pelos resultados, que a moagem seguida da separação granulométrica é suficiente para concentrar quase 40% do cobre na fração mais grosseira.



**Figura 27** – Percentuais de cobre nas frações oriundas da separação granulométrica caracterizadas por FRx.

### 5.6 Caracterização, Quanto à Composição, das Frações Leve e Pesada Oriundas da Separação Gravimétrica por Lixiviação em Água Régia

Após a lixiviação das frações leves, o sistema foi resfriado e filtrado. Após a secagem do filtrado foram obtidas as seguintes massas de cada uma das frações que não foram digeridas em água régia:

- F1 – 0,888 g;
- F2 – 0,838 g;
- F3 – 0,952 g.

A massa inicial de cada fração leve utilizada no ensaio de lixiviação foi de 2 g. A Tabela 16 apresenta o percentual de materiais metálico e não-metálico em cada uma das frações leves oriundas da separação gravimétrica, levando-se em conta que foi considerado não-metálico o material não-lixiviado em água régia.

**Tabela 16** – Percentuais dos materiais metálico e não-metálico nas frações leves oriundas da gravimetria.

	Metálico (%)	Não-metálico (%)
F1	55,6	44,4
F2	58,1	41,9
F3	52,4	47,6

Os resultados observados na Tabela 16 não mostram nenhuma tendência de concentração dos materiais metálicos contidos nas frações leves. A fração intermediária (F2) apresentou um leve destaque no percentual da fração metálica.

Após o ensaio de lixiviação, o sistema foi filtrado e o material lixiviado foi encaminhado à análise química onde foi feita a pesquisa dos metais alumínio, ouro, prata, cobre, ferro, níquel, chumbo, estanho e zinco. O resultado desta análise está mostrado na Tabela 17.

**Tabela 17** – Concentração (%) dos metais presentes nas frações leves oriundas da gravimetria.

	<b>Al</b>	<b>Au</b>	<b>Ag</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>Sn</b>	<b>Zn</b>
F1	2,2	0,02	<10 <sup>-5</sup>	3,2	2,8	0,17	0,07	0,29	0,03
F2	4,6	0,46	<10 <sup>-5</sup>	24,0	48,6	0,51	0,19	0,75	0,16
F3	1,16	0,28	<10 <sup>-5</sup>	32,8	19,2	0,23	0,06	0,59	0,04

Os resultados mostrados na Tabela 17 indicam quantidades de cobre bem superiores às da maioria dos demais componentes. A concentração da prata foi muito pequena, indicando que a mesma se concentrou na fração pesada. Com exceção da prata e do cobre, os demais elementos apresentaram um padrão de comportamento semelhante nas frações. Atingiram uma maior concentração nas frações com diâmetros intermediários. Isto pode ser explicado pelo fato de os metais não estarem totalmente liberados, estando agregados aos materiais não-metálicos que possuem densidade menor que a do líquido extrator.

Já no ensaio com as frações pesadas foram obtidas as seguintes massas de cada uma das frações que não foram digeridas por água régia:

- F1 – 0,208 g;
- F2 – 0,475 g;
- F3 – 0,750 g.

Considerando a massa inicial de 2 g, a Tabela 18 apresenta o percentual dos materiais metálico e não-metálico em cada uma das frações oriundas da separação gravimétrica.

**Tabela 18** – Percentuais de materiais metálico e não-metálico das frações pesadas oriundas da gravimetria.

	<b>Metálico (%)</b>	<b>Não-metálico (%)</b>
F1	89,6	10,4
F2	76,2	23,8
F3	62,5	37,5

Os resultados observados na Tabela 18 mostram uma tendência mais acentuada de os materiais metálicos se concentrarem nas frações mais finas, quando comparado à caracterização das frações leves. Isto pode ser explicado pelo fato de os metais se encontrarem mais liberados dos materiais não-metálicos.

O lixiviado obtido foi encaminhado à análise química onde foi feita a pesquisa dos metais cobre, alumínio, chumbo, ferro, estanho, níquel, zinco, prata e ouro. O resultado desta análise está mostrado na Tabela 19.

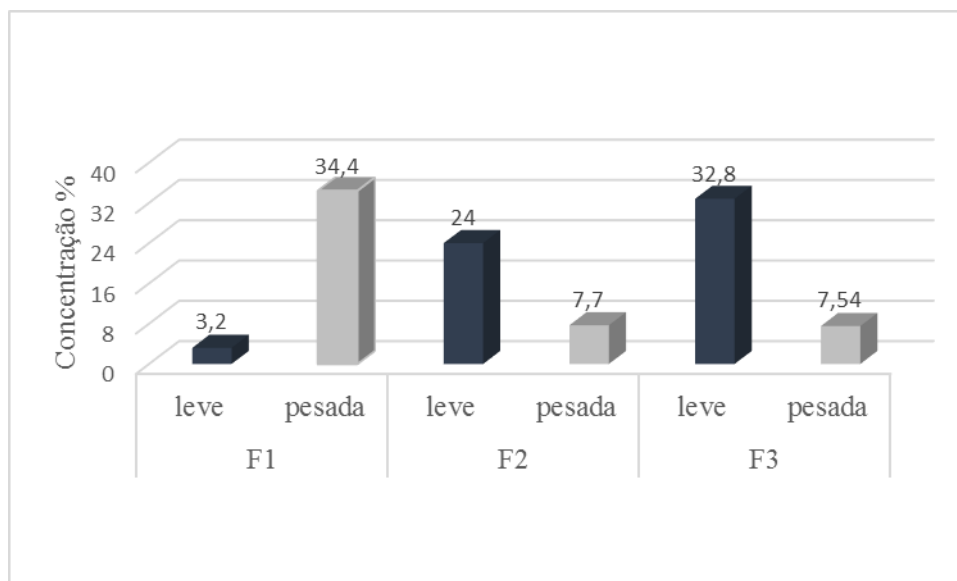
**Tabela 19** – Concentração (%) dos metais presentes nas frações pesadas oriundas da gravimetria

	<b>Al</b>	<b>Au</b>	<b>Ag</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>Sn</b>	<b>Zn</b>
F1	1,17	0,78	0,38	34,4	11,2	10,8	6,2	28,8	1,39
F2	0,48	0,08	<10 <sup>-5</sup>	7,7	2,2	3,2	1,10	7,2	0,55
F3	0,42	0,04	<10 <sup>-5</sup>	7,54	3,6	1,90	0,47	3,0	0,47

Os resultados mostrados na Tabela 19 apresentam um padrão de comportamento bem definido, onde os metais pesquisados se concentraram nas frações mais finas. Isto é explicado pelo fato de nas frações pesadas terem uma quantidade de material não-metálico menor, fazendo com que haja mais metais liberados.

Esta técnica não foi muito eficiente na separação do cobre, uma vez que o mesmo apresentou concentração considerável nas três frações. Houve concentração considerável dos metais preciosos ouro e prata na fração mais fina. Isto torna a reciclagem destes resíduos economicamente mais interessante. O chumbo, que é perigoso ao meio ambiente, se concentrou na fração mais fina. Trabalhos futuros podem estudar técnicas de sua reciclagem, uma vez que processos para sua reciclagem são necessários para a proteção do meio ambiente.

Na Figura 28 estão representadas as concentrações de cobre ao longo das frações F1, F2 e F3 leve e pesada, obtidas na separação gravimétrica. Observa-se que nas frações leves oriundas da separação gravimétrica, a concentração aumenta à medida que cresce o diâmetro das partículas das frações. Como a fração leve tem uma quantidade maior de material não-metálico que prende os metais, nas partículas com maiores diâmetros há uma quantidade maior de cobre não-liberado. Nas frações pesadas há uma quantidade menor de material não-metálico, logo há mais cobre liberado em solução que, por isso, se concentra nas frações mais finas.



**Figura 28** – Percentuais de cobre nas frações oriundas da separação gravimétrica digeridas em água régia.

### 5.7 Remoção de Metais por Precipitação

Os resultados das análises químicas realizadas nas amostras resultantes dos ensaios realizados com as seis diferentes misturas de coagulante e floculante no aparelho *Jar Test* estão mostrados na Tabela 20.

**Tabela 20** – Concentrações inicial e residual (mg/L) na solução após a remoção dos metais pela mistura coagulante e floculante.

Elemento	F1 pesada	F1 pesada diluída	Após remoção					
			A	B	C	D	E	F
Ag	188	0,94	0,1	0,17	0,05	0,05	0,07	0,05
Al	585	2,92	1	1	1	1	1	1
Au	389	1,94	0,2	0,38	0,2	0,2	0,2	0,2
Cu	17200	86	9,5	124	9,9	10,4	10,4	10
Fe	5600	28	0,19	3,7	0,13	0,16	0,1	0,15
Ni	5400	27	0,1	4	0,14	0,16	0,19	0,15
Pb	3100	15,5	0,1	2,2	0,13	0,15	0,1	0,14
Sn	14400	72	1	7,7	1,3	1	1	1
Zn	697	3,48	0,05	0,55	0,05	0,05	0,05	0,06

Com os dados da Tabela 20, foram calculados os percentuais de remoção dos metais obtidos para cada uma das misturas no ensaio de *Jar test*, mostrados na Tabela 21. Exceto o

alumínio, cobre e ouro, todos os demais metais alcançaram recuperações percentuais maiores que 90%.

**Tabela 21** – Percentuais de recuperação dos metais nas PCI no ensaio de *Jar test*.

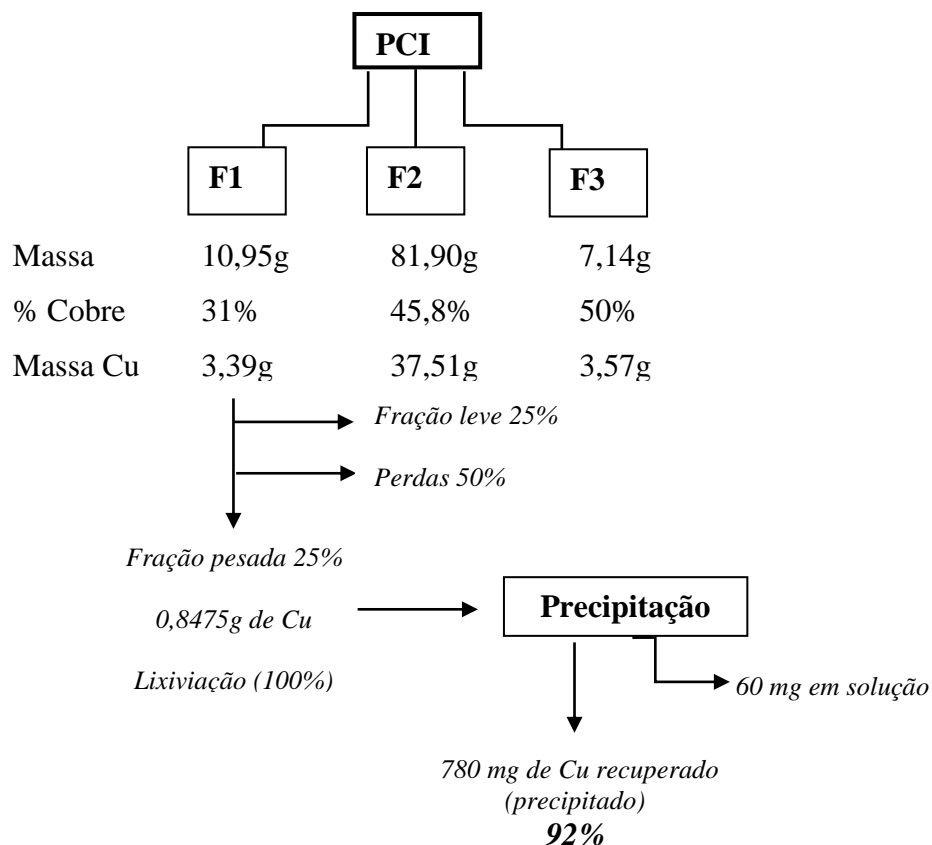
Elemento	Misturas					
	A	B	C	D	E	F
Ag	89,36	81,91	94,68	94,68	92,55	94,68
Al	65,81	65,81	65,81	65,81	65,81	65,81
Au	89,72	80,46	89,72	89,72	89,72	89,72
Cu	88,95	-44,19	88,49	87,91	87,91	88,37
Fe	99,32	86,79	99,54	99,43	99,64	99,46
Ni	99,63	85,18	99,48	99,41	99,30	99,44
Pb	99,35	85,81	99,16	99,03	99,35	99,10
Sn	98,61	89,31	98,19	98,61	98,61	98,61
Zn	98,56	84,22	98,56	98,56	98,56	98,28

A mistura B obteve, na média, os resultados mais insatisfatórios para todos os metais, exceto o zinco. Tanto para o ouro quanto para o cobre a eficiência na remoção ficou na discreta faixa dos 90 %. As variáveis do processo temperatura, pH e proporção de coagulante/floculante devem ser alteradas com o objetivo de se obterem melhores percentuais de remoção de metais.

A baixa recuperação do ouro pode ter sido causada pelo fato de o ouro estar na forma livre (não na forma de óxido) desde o início do processo o que dificulta a adsorção via coagulação e floculação.

O valor do pH fixado em 9,0 para todas as misturas pode ter sido responsável pelos percentuais de recuperação muito próximos um dos outros, indicando ser esta uma variável crucial nos valores finais de recuperação.

Para resumir os cálculos e procedimentos para estimar a recuperação percentual do cobre, a Figura 29 apresenta uma sequência de operações e informações compreendendo um balanço de massa com base de 100 g de PCI.



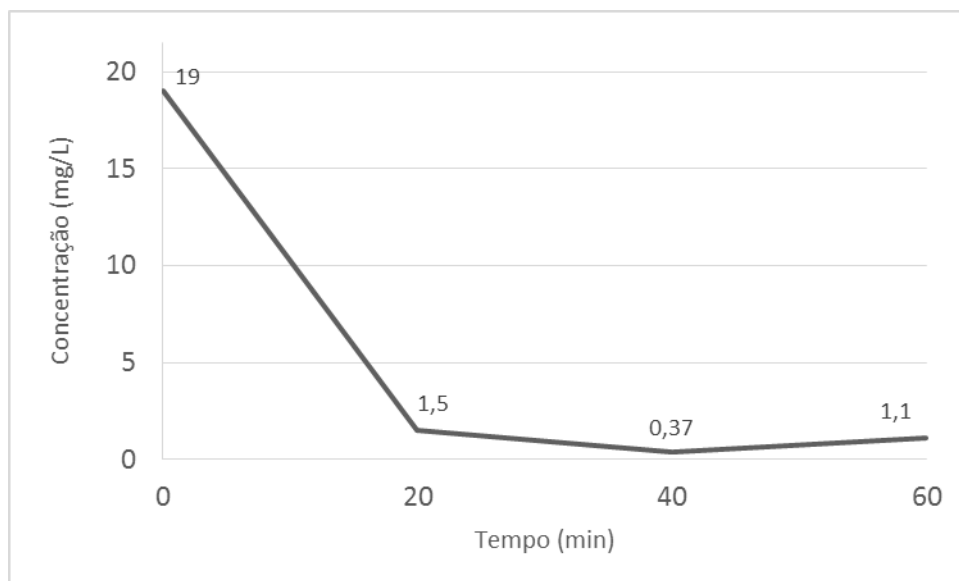
**Figura 29** – Balanço de massa do processo para o cálculo da recuperação percentual de cobre.

### 5.8 Recuperação Eletrolítica de Cobre das Placas de Circuito Impresso

A segunda alternativa de recuperação de cobre das PCI que foi objetivo deste trabalho é o uso de processo eletrolítico. Foi utilizada neste ensaio a fração pesada F1 oriunda da separação gravimétrica em virtude da sua maior concentração de cobre conforme dados da Tabela 19. O tempo 0 (zero) representa o teor de cobre inicial no eletrólito.

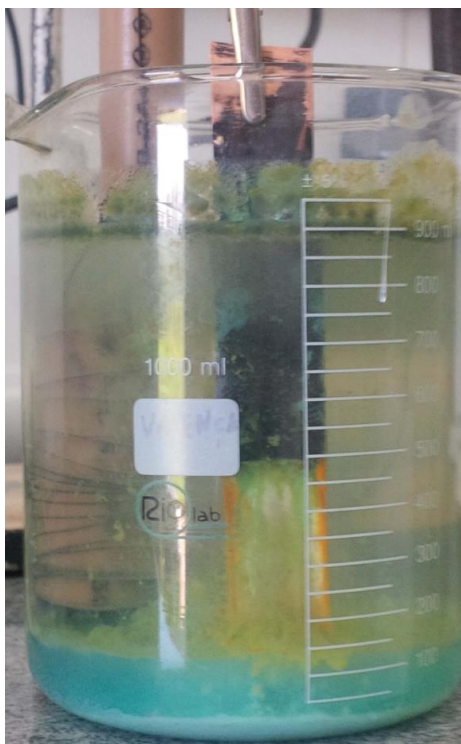
A recuperação do cobre foi avaliada através da aplicação de técnica eletrolítica, onde se verificou a diminuição da concentração de cobre no eletrólito ao longo do tempo. Em três tempos diferentes amostras foram coletadas e enviadas à análise química para se verificar a concentração de cobre. Ao final do processo, o pH da solução foi verificado, alcançando o valor de 10,29.

Na Figura 30 estão apresentadas as concentrações de cobre ao longo do tempo de ensaio. O melhor resultado, ou seja, a menor concentração de cobre foi obtida com o tempo de 40 minutos, significando que a maior parte do cobre presente na solução foi recuperado na forma de uma lama azul precipitada, conforme mostra a Figura 31. Considerando o pH final da solução igual a 10,29 e sua característica física, o cobre foi recuperado na forma de hidróxido cúprico –  $\text{Cu}(\text{OH})_2$ .



**Figura 30** – Concentração de cobre na célula eletrolítica variando com o tempo.

O processo eletrolítico apresentou, após 40 minutos, recuperação de 98,05% do cobre presente na solução. Esse resultado é bastante animador para fomentar as pesquisas posteriores na área, pois deve-se levar em conta os potenciais eletrolíticos dos demais metais para verificar a possibilidade de recuperação dos demais metais, especialmente os valiosos como o ouro e a prata.



**Figura 31** – Etapa final do processo eletrolítico



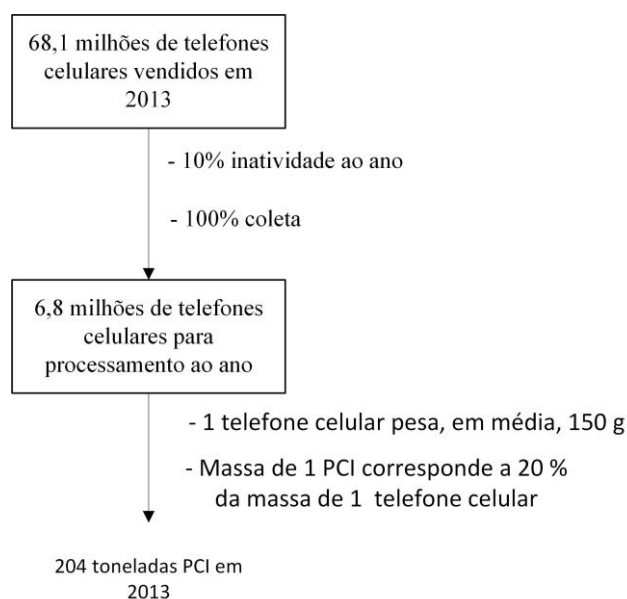
O acompanhamento visual do processo mostrou, inicialmente, um turvamento da amostra. Ao longo do tempo se mostrou nítida a formação de um precipitado na forma de uma lama azul. Houve a formação de gás o hidrogênio (H<sub>2</sub>) em um dos eletrodos devido à redução dos íons H<sup>+</sup> em solução. Ao fim do experimento a solução tornou-se límpida com a lama precipitada azul depositada no fundo do recipiente.

## 5.9 Valor Agregado dos Metais Presentes nas PCI

Para o cálculo da receita média que se pode gerar, no Brasil, tomando como base o ano de 2013, ao processar PCI de telefones celulares descartados, serão feitas as seguintes considerações:

- percentual médio de cada metal é o obtido pela caracterização por fluorescência de raios X;
- a recuperação de cada metal é 100 %;
- foram vendidos no Brasil, em 2013, 68,1 milhões de aparelhos de telefones celulares (TELECO, 2014);
- estimativas indicam que 10 a 20% dos telefones celulares entram em inatividade a cada ano (SILVEIRA et al., 2013). Será considerada, para fins de cálculos, 10% o percentual de celulares inativos no ano e que houve 100% de coleta;
- testes realizados neste trabalho indicam que a massa de 01 telefone celular é, em média, 150 g e a massa da PCI corresponde a 20%, em média, deste total.

Uma estimativa da quantidade de PCI que são obtidas ao ano, no Brasil, é apresentada na Figura 32 levando-se em conta as considerações realizadas.



**Figura 32** – Estimativa da quantidade de PCI geradas em 2013 no Brasil.

A receita média gerada com o processamento das PCI está demonstrada na Tabela 22. Devem ser levadas em consideração as despesas com recursos humanos, energia elétrica, equipamento e reagentes.

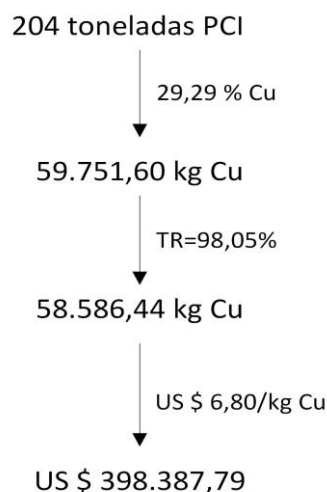
**Tabela 22** – Receita média gerada no processamento de PCI

	% de metais nas PCI	US\$/kg <sup>a</sup>	Massa de metais nas PCI (kg)	Receita gerada (US\$)
Ag	0,23	514,45	469,20	241.379,94
Al	11,81	2,04	24.092,40	49.148,50
Au	0,07	37589,71	142,8	5.367.810,59
Cu	29,29	6,80	59.751,60	406.310,88
Ni	1,26	18,05	2.570,40	46.395,72
Pb	0,39	2,13	795,60	1.694,63
Sn	1,61	20,94	3.284,40	68.775,34
Zn	0,16	2,29	326,40	747,46
<b>Total</b>	<b>44,82</b>			<b>6.182.263,06</b>

<sup>a</sup> [www.alpex.com.br/lmes](http://www.alpex.com.br/lmes), [www.indexmundi.com](http://www.indexmundi.com), <http://br.advfn.com/commodities>

Do total de 44,82% dos metais presentes nas placas de circuito impresso de aparelhos celulares, 29,29% corresponde ao cobre, o que equivale a US\$ 406.310,88 por ano.

Considerando que no processo mecânico seguido de remoção por processo eletrolítico obteve-se 98,05 % de remoção de cobre, o valor agregado seria de US\$ 398.387,79 ao ano pelo processamento de PCI conforme mostrado na Figura 33.



**Figura 33** – Estimativa da receita média gerada com cobre por meio do processamento de PCI.

Os valores alcançados, embora teóricos, dão ideia do quanto de receita pode ser gerada com o processamento das PCI de telefones celulares descartados no Brasil. Nesta simulação, o ouro, ainda que em pequena quantidade, pode gerar mais de 80 % da receita total com o cobre logo em seguida. Sob o aspecto econômico, mais estudos devem ser realizados para recuperação dos metais preciosos e também do cobre.



## 6 CONCLUSÕES

Analisando os resultados obtidos nesse trabalho pode-se afirmar que:

- Sucatas de placas de circuito impresso podem ser recicladas por meio de processamento mecânico.
- Através do processo de moagem, foi possível concentrar cerca de 80 % de metais nas frações de maior granulometria ( $0,85 \text{ mm} < F < 1,15 \text{ mm}$ ).
- A separação por diferença de densidade, através de tetrabromoetano ( $d = 2,5 \text{ g/cm}^3$ ), se mostrou bastante eficiente, proporcionando a concentração de quase 90 % de metais na fração afundada mais fina (F1).
- O valor da densidade de corte utilizado ( $d = 2,5 \text{ g/cm}^3$ ) não foi favorável à separação do alumínio, uma vez que é muito próximo ao valor de sua densidade ( $d = 2,7 \text{ g/cm}^3$ ).
- As sucatas são matérias primas interessantes sob o ponto de vista econômico pois apresentam ouro, prata e cobre em quantidades que justificam a pesquisa de técnicas para seu reaproveitamento.
- Dentre os metais pesquisados, o que está presente em maiores quantidades é o cobre, mas ferro, níquel e o estanho também possuem uma grande participação na composição das placas de circuito impresso analisadas.
- De acordo com a norma ABNT 10004 as placas de circuito impresso devem ser classificadas como resíduos de classe I, ou seja, são resíduos perigosos que necessitam de um tratamento adequado para serem dispostos devido ao elevado teor de chumbo encontrado.
- As frações leves resultantes do processo de separação por densidade foram caracterizadas de acordo com a norma ABNT 10004 e classificadas como resíduos perigosos, pois o teor de chumbo permaneceu acima do permitido.
- Os resultados observados na análise por difração de raios X reforçam a ideia de que quanto menor o diâmetro, mais liberados estão os metais favorecendo sua recuperação.
- As misturas de coagulante / floculante apresentaram remoção de metais satisfatória, com exceção da mistura B, atingindo valores superiores a 90 % nas condições de pH e concentrações estudadas. Os resultados foram ruins para o ouro talvez pelo fato de o mesmo estar presente na forma livre, e não óxido, o que dificulta sua remoção.
- A recuperação de cobre por processo eletrolítico alcançou 98,05 %, valor superior ao obtido pela mistura de coagulante / floculante.
- Para recuperação do metal puro, o processo mais indicado é o processo eletrolítico uma vez que um metal, em específico, se deposita em um dos eletrodos. A mistura coagulante/floculante remove os metais em conjunto, não sendo mais indicada para recuperação de metais específicos.
- Uma previsão de receita média gerada, caso se recuperasse os metais mais relevantes contidos nas placas de circuito impressos dos telefones celulares descartados no Brasil, no ano de 2013, levou ao valor médio de US \$ 6.182.263,06. Deve-se considerar os gastos com equipamentos, energia elétrica e reagentes para este processamento.



## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Como os metais devem estar liberados para melhorar a eficiência de recuperação, deve-se fazer um estudo com um número maior de frações diminuindo, assim, o intervalo de diâmetro das partículas.
- Estudar novas densidades de corte para melhorar a eficiência do processo.
- Estudar a influência da forma das partículas no processo de separação por densidade.
- Testar o uso de suspensões ou soluções inorgânicas para fazer a separação por densidade, evitando-se o uso de líquidos orgânicos que são caros e de difícil manuseio.
- Estudar técnicas para recuperação de chumbo contido na fração leve oriunda separação gravimétrica e que é considerada resíduo neste estudo.
- Testar lixiviação em outras faixas de temperatura e tempo.
- Fazer um estudo comparativo com outros agentes lixiviantes.
- Aplicar uma unidade de separação a base de propriedades elétricas após o processo de moagem para retirada de materiais não-condutores.
- Avaliar o efeito da aplicação de uma unidade de separação magnética após o processo de moagem para retirada dos materiais magnéticos (ferro e níquel).
- Estudar a viabilidade de recuperar ouro e prata através de processos eletrolíticos.
- Testar outras proporções da mistura coagulante / floculante na eficiência da remoção dos metais, além de outros valores para o pH.





## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ABINEE. **Avaliação Setorial**. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/abinee/decon/decon11.htm>>. Acesso em: 20/5/2014.
- ABRACI, Associação Brasileira de Circuitos Impressos. **Ampliando mercado de PCI através da certificação**. Disponível em: <<http://www.abraci.org.br/arquivos/ICI.pdf>>.
- ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil, p. 116, 2012. Disponível em: [http://www.abrelpe.org.br/panorama\\_apresentacao.cfm](http://www.abrelpe.org.br/panorama_apresentacao.cfm)
- ANATEL. **Número de acessos móveis no Brasil**. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/Portal/exibirPortalInternet.do>>. Acesso em: 20/5/2014.
- ANDRADE, R. **Caracterização e Classificação de Placas de Circuito Impresso de Computadores como Resíduos Sólidos**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Campinas. Campinas, SP, 2002.
- ANDUEZA, F. **Lixo eletrônico**. Disponível em: <<http://lixoeletronico.org/blog/voce-que-adora-o-mundo-digital-conhece-seu-lado-sujo>>. Acesso em: 27/4/2014.
- AQUINO, J. A. DE; OLIVEIRA, M. L. M. DE; BRAGA, P. F. A. **Ensaio em Meio Denso**. Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais. p.300, 2007. Rio de Janeiro.
- BERBADES, A.; BOHLINGER, I.; RODRIGUEZ, D.; MILBRANDT, H.; WUTH, W. **Recycling of Printed Circuit Boards by Melting with Oxidising/Reducing Top Blowing Process**. EPD Congress, p. 363–375, 1997.
- BERNARDES, I. P. T. P. **Reciclagem de Placas de Circuitos Eletrônicos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Nova de Lisboa, Monte da Caparica, Lisboa, 2009.
- BEVILAQUA, D.; LEITE, A. L. L. .; GARCIA, O.; TUOVINEN, O. **Oxidation of chalcopyrite by Acidithiobacillus ferrooxidans and Acidithiobacillus thiooxidans in shake flasks**. Process Biochemistry, v. 38, n. 4, p. 587–592, 2002. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032959202001693>>. Acesso em: 23/5/2014.
- BISWAS, A. K.; DAVENPORT, W. G.; KING, M.; SCHLESINGER, M. **Extractive Metallurgy of Copper**. Fourth ed. Elsevier B.V., 2002.
- BLEIWAS, D.; KELLY, T. **Obsolete Computers, “Gold Mine”, or High-Tech Trash? Resource Recovery from Recycling**. U.S. Geological Survey, n. July, p. 4, 2001. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/fs/fs060-01/>>.
- BOSECKER, K. **Bioleaching: metal solubilization by microorganisms**. FEMS Microbiology Reviews, v.20, n.3-4, p.591–604, 1997. Disponível em: <[http://doi.wiley.com/10.1016/S0168-6445\(97\)00036-3](http://doi.wiley.com/10.1016/S0168-6445(97)00036-3)>.

BRANDL, H.; FARAMARZI, M. A. **Microbe-metal-interactions for the biotechnological treatment of metal-containing solid waste**. *China Particuology*, v. 4, n. 2, p. 93–97, 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1672251507602449>>. Acesso em: 23/5/2014.

BRITANNICA, E. **Mineral processing**. Disponível em: <<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/383742/mineralprocessing/81313/Gravity-separation>>. Acesso em: 25/4/2014.

BURKE, M. **The gadget scrap heap**. *Chemistry World*, n. June, 2007. Disponível em: <[http://www.rsc.org/images/Gadget scrap heap\\_tcm18-87902.pdf](http://www.rsc.org/images/Gadget%20scrap%20heap_tcm18-87902.pdf)>.

CEMPRE. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Disponível em: <[http://www.cempre.org.br/download/pnrs\\_002.pdf](http://www.cempre.org.br/download/pnrs_002.pdf)>. Acesso em: 24/5/2014.

CHANCEREL, P.; ROTTER, S. **Recycling-oriented characterization of small waste electrical and electronic equipment**. *Waste management (New York, N.Y.)*, v.29, n.8, p. 2336–52, 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X09001342>>. Acesso em: 23/5/2014.

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. **Teoria e prática do tratamento de minérios: britagem, peneiramento e moagem**. São Paulo, 1999.

CHOI, M.-S.; CHO, K.-S.; KIM, D.-S.; KIM, D.-J. **Microbial Recovery of Copper from Printed Circuit Boards of Waste Computer by Acidithiobacillus ferrooxidans**. *Journal of Environmental Science and Health, Part A- Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, v.39, n.11-12, p.2973–2982, 2004. Disponível em: <<http://www.dekker.com/servlet/product/DOI/10.1081-ESE-200034763>>. Acesso em: 23/5/2014.

CHRISTIAN LUDWIG, S. S. **Municipal Solid Waste Management**. 2003.

COPPER, A. **Why Antimicrobial Copper?** Disponível em: <<http://www.antimicrobialcopper.com/us/why-antimicrobial-copper/introduction-to-antimicrobial-copper.aspx>>. Acesso em: 10/12/2014.

CRUZ, H. F. M. M. DA. **Estudo da Resistência à Corrosão em Sistemas Solares Térmicos**. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto. Porto, 2010.

CUI, J.; FORSSBERG, E. **Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review**. *Journal of Hazardous Materials*, v. 99, n. 3, p. 243–263, 2003. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030438940300061X>>. Acesso em: 1/5/2014.

CUI, J.; ZHANG, L. **Metallurgical recovery of metals from electronic waste: a review**. *Journal of hazardous materials*, v. 158, n. 2-3, p. 228–56, 2008. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18359555>>. Acesso em: 23/2/2014.

DALRYMPLE, I.; WRIGHT, N.; KELLNER, R.; et al. **An integrated approach to electronic waste (WEEE) recycling**. *Circuit World*, v.33, n.2, p.52–58, 2007. Disponível em: <<http://www.emeraldinsight.com/10.1108/03056120710750256>>. Acesso em: 23/5/2014.

DEVECI, H.; YAZICI, E.; AYDIN, U.; YAZICI, R.; AKCIL, A. **Extraction of copper from scrap TV boards by sulphuric acid leaching under oxidising conditions**. *Proceedings of Going Green-CARE INNOVATION*, p. 7, 2010.

DUAN, H.; HOU, K.; LI, J.; ZHU, X. **Examining the technology acceptance for dismantling of waste printed circuit boards in light of recycling and environmental concerns**. *Journal of environmental management*, v. 92, n. 3, p. 392–9, 2011. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21084150>>. Acesso em: 27/5/2014.

EHRlich, H. L. **Past, present and future of biohydrometallurgy**. *Hydrometallurgy*, v. 59, n. 2-3, p. 127–134, 2001. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304386X00001651>>. Acesso em: 23/5/2014.

ELLINGHAM, H. J. T.; MOORE, S. **Electrochemistry and electrometallurgy**. *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, v. 69, n. 409, p. 185–192, 1931. Disponível em: <<http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/jiee-1.1931.0009>>. Acesso em: 27/5/2014.

EPA, U. S. E. P. A. **Statistics on the Management of Used and End-of-Life Electronics**. Disponível em: <<http://www.epa.gov/osw/conserva/materials/ecycling/manage.htm>>. Acesso em: 14/11/2012.

EPA, U. S. E. P. A. **The Life Cycle of a Cell Phone**. Disponível em: <<http://www.epa.gov/epawaste/education/pdfs/life-cell.pdf>>. Acesso em: 15/3/2014.

ESWARAIAH, C.; KAVITHA, T.; VIDYASAGAR, S.; NARAYANAN, S. S. **Classification of metals and plastics from printed circuit boards (PCB) using air classifier**. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, v. 47, n. 4, p. 565–576, 2008. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0255270106002996>>. Acesso em: 23/5/2014.

EUROPEAN COMMISSION. **Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council**. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32002L0096>>. Acesso em: 19/5/2014a.

EUROPEAN COMMISSION. **Restriction of Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment**. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32002L0095>>. Acesso em: 19/5/2014b.

FIGUEIRA, H. V. O.; ALMEIDA, S. L. M.; LUZ, A. B. **Cominuição**. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2004-182-00.pdf>>. Acesso em: 28/4/2014.

GALBRAITH, P.; DEVEREUX, J. L. **Beneficiation of printed wiring boards with gravity concentration**. *Conference Record 2002 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment (Cat. No.02CH37273)*. Anais. p.242–248, 2002. IEEE. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1003273>>. Acesso em: 23/5/2014.

GARTNER. **Número de aparelhos celulares vendidos no mundo**. Disponível em: <<http://www.gartner.com/newsroom/id/2665715>>. Acesso em: 13/2/2014.

GERBASE, A. E.; OLIVEIRA, C. R. **Reciclagem do lixo de informática: uma oportunidade para a química**. Química Nova, v. 35, n. 7, p. 1486–1492, 2012.

GLOE, K.; MÜHL, P.; KNOTHE, M. **Recovery of precious metals from electronic scrap, in particular from waste products of the thick-layer technique**. Hydrometallurgy, v. 25, n. 1, p. 99–110, 1990. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0304386X9090067C>>. Acesso em: 21/5/2014.

GOOSEY, M.; KELLNER, R. **A Scoping Study End-of-Life Printed Circuit Boards**. Environmental Working Group, n. August, 2002a. Disponível em: <[http://www.cfsd.org.uk/seeba/TD/reports/PCB\\_Study.pdf](http://www.cfsd.org.uk/seeba/TD/reports/PCB_Study.pdf)>.

GOOSEY, M.; KELLNER, R. **A Scoping Study End-of-Life Printed Circuit Boards**. Environmental Working Group, n. August, p.2, 2002b. Disponível em: <[http://www.cfsd.org.uk/seeba/TD/reports/PCB\\_Study.pdf](http://www.cfsd.org.uk/seeba/TD/reports/PCB_Study.pdf)>.

GRAMATYKA, P.; NOWOSIELSK, R.; SAKIEWICZ, P.; AL., E. **Recycling of waste electrical and electronic equipment**. , v. 20, p. 535–538, 2007.

GREENPEACE. **Minería y Basura Electrónica**. Disponível em: <<http://www.greenpeace.org/argentina/Global/argentina/report/2012/contaminacion/inform-raee-V-1.pdf>>. Acesso em: 12/11/2014.

GUO, J.; GUO, J.; XU, Z.; AL., E. **Recycling of non-metallic fractions from waste printed circuit boards: a review**. Journal of hazardous materials, v. 168, n. 2-3, p. 567–90, 2009. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19303702>>. Acesso em: 12/3/2014.

HAGELÜKEN, C. **Recycling of electronic scrap at umicore precious metals**. Acta Metallurgica Slovaca, p. 111–120, 2006a. Disponível em: <<http://web.tuke.sk/hf-knkaso/content/veda/konferencie/waste/hagelunken.pdf>>.

HAGELÜKEN, C. **Improvising metal returns and eco-efficiency in electronics recycling - a holistic approach for interface optimization between pre-processing and integrated metals smelting and refining**. International Symposium on Eletronics & the Environment, p. 218–233, 2006b.

HAGHSHENAS, D. F.; ALAMDARI, E. K.; TORKMAHALLEH, M. A.; BONAKDARPOUR, B.; NASERNEJAD, B. **Adaptation of Acidithiobacillus ferrooxidans to high grade sphalerite concentrate**. Minerals Engineering, v. 22, n. 15, p. 1299–1306, 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687509001769>>. Acesso em: 23/5/2014.

HAYES, P. C. **Process Principles in Minerals and Materials Production**. 3rd ed. Brisbane, Queensland, Australia: Hayes Publishing co, 1993.

HE, W.; LI, G.; MA, X.; et al. **WEEE recovery strategies and the WEEE treatment status in China**. Journal of hazardous materials, v. 136, n. 3, p. 502–12, 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389406005644>>. Acesso em: 11/5/2014.

HOFFMANN, J. E. **Recovering precious metals from electronic scrap**. JOM, v. 44, n. 7, p. 43–48, 1992. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/BF03222275>>. Acesso em: 23/5/2014.

HUANG, K.; GUO, J.; XU, Z.; AL., E. **Recycling of waste printed circuit boards: a review of current technologies and treatment status in China**. Journal of hazardous materials, v. 164, n. 2-3, p. 399–408, 2009. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18829162>>. Acesso em: 24/2/2014.

HUISMAN, J.; MAGALINI, F.; KUEHR, R.; et al. **Review of Directive 2002/96/EC on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)**. United Nations University, p. 1–11, 2008. Bonn. Disponível em: <[http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/pdf/final\\_rep\\_unu.pdf](http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/pdf/final_rep_unu.pdf) >.

ILYAS, S.; ANWAR, M. A.; NIAZI, S. B.; AFZAL GHOURI, M. **Bioleaching of metals from electronic scrap by moderately thermophilic acidophilic bacteria**. Hydrometallurgy, v. 88, n. 1-4, p. 180–188, 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304386X07001077>>. Acesso em: 23/5/2014.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **Measuring Information Society**. Geneva, 2013.

JACKSON, E. **Hydrometallurgical extraction and reclamation**. New York: Ellis Horwood Limited, 1986.

JIANG, W.; JIA, L.; ZHEN-MING, X. **A new two-roll electrostatic separator for recycling of metals and nonmetals from waste printed circuit board**. Journal of hazardous materials, v. 161, n. 1, p. 257–262, 2009. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18554788>>. Acesso em: 18/6/2014.

KASPER, A. C. **Caracterização e Reciclagem de Materiais Presentes em Sucatas de Telefones Celulares**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 2011.

KHETRIWAL, D. S.; KRAEUCHI, P.; WIDMER, R. **Producer responsibility for e-waste management: key issues for consideration - learning from the Swiss experience**. Journal of environmental management, v. 90, n. 1, p. 153–65, 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030147970700312X>>. Acesso em: 7/5/2014.

KIM, E.; KIM, M.; LEE, J.; PANDEY, B. D. **Selective recovery of gold from waste mobile phone PCBs by hydrometallurgical process.** Journal of hazardous materials, v. 198, p. 206–15, 2011. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22040799>>. Acesso em: 18/3/2014.

KUMAR, V.; BEE, D. J.; SHIRODKAR, P. S.; et al. **Towards Sustainable “Product and Material Flow” Cycles: Identifying Barriers to Achieving Product Multi-Use and Zero Waste. Energy Conversion and Resources.** Anais. v. 2005, p.433–442, 2005. ASME. Disponível em: <<http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1581618>>. Acesso em: 30/6/2014.

LADOU, J. Printed circuit board industry. **International journal of hygiene and environmental health,** v. 209, n. 3, p. 211–9, 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1438463906000204>>. Acesso em: 5/5/2014.

LEE, C. K.; RHEE, K. I.; SOHN, H. J. **Recovery of gold from electronic scrap by hydrometallurgical processes.** Chawon Risaikring, v. 6, n. 3, p. 36–40, 1997.

LEHNER, T. **Integrated recycling of non-ferrous metals at Boliden Ltd. Ronnskar smelter.** Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment. ISEE - 1998 (Cat. No.98CH36145), p. 42–47, 1998. Ieee. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=675028>>.

LI, J.; LU, H.; GUO, J.; XU, Z.; ZHOU, Y. **Recycle technology for recovering resources and products from waste printed circuit boards.** Environmental science & technology, v. 41, n.6, p.1995–2000, 2007. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17410796>>.

LI, J.; LU, H.; LIU, S.; XU, Z. **Optimizing the operating parameters of corona electrostatic separation for recycling waste scraped printed circuit boards by computer simulation of electric field.** Journal of Hazardous Materials, v. 153, n. 1-2, p. 269–275, 2008. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17900802>>. Acesso em: 18/6/2014.

LI, J.; LU, H.; XU, Z.; ZHOU, Y. **Critical rotational speed model of the rotating roll electrode in corona electrostatic separation for recycling waste printed circuit boards.** Journal of hazardous materials, v. 154, n. 1-3, p. 331–336, 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389407014690>>. Acesso em: 23/5/2014.

LONG, L.; SUN, S.; ZHONG, S.; et al. **Using vacuum pyrolysis and mechanical processing for recycling waste printed circuit boards.** Journal of hazardous materials, v. 177, n. 1-3, p. 626–32, 2009. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20060640>>. Acesso em: 24/2/2014.

LUZ, A. B.; COSTA, L. S. N.; POSSA, M. V.; ALMEIDA, S. L. M. **Tratamento de Minérios.** CETEM/MCT, 1995.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. **Tratamento de Minérios**. 4<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004.

METCALF; EDDY. **Wastewater Engineering treatment Disposal Reuse**. 4<sup>a</sup> ed. New York: McGraw - Hill Book, 2003.

MORAES, V. T. DE. **Recuperação de Metais a Partir do Processamento Mecânico e Hidrometalúrgico de Placas de Circuito Impressos de Celulares Obsoletos**. Tese de Doutorado. São Paulo, SP, 2011.

MORIN, D.; LIPS, A.; PINCHES, T.; et al. **Integrated project for the development of biotechnology for metal-bearing materials in Europe**. *BioMinE*, v. v. 83, p. 69–76, 2006.

MURUGAN, R. V.; BHARAT, S.; DESHPANDE, A. P.; VARUGHESE, S.; HARIDOSS, P. **Milling and separation of the multi-component printed circuit board materials and the analysis of elutriation based on a single particle model**. *Powder Technology*, v. 183, n. 2, p. 169–176, 2008. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0032591007003634>>. Acesso em: 12/3/2014.

NATIONS, U. **World Population Policies**. New York, 2013a.

NATIONS, U. **World Population Policy**. New York, 2013b.

NNOROM, I. C.; OSIBANJO, O. **Overview of electronic waste (e-waste) management practices and legislations, and their poor applications in the developing countries**. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 52, n. 6, p. 843–858, 2008. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344908000165>>. Acesso em: 3/6/2014.

OISHI, T.; KOYAMA, K.; KONISHI, H.; TANAKA, M.; LEE, J.-C. **Influence of ammonium salt on electrowinning of copper from ammoniacal alkaline solutions**. *Electrochimica Acta*, v. 53, n. 1, p. 127–132, 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001346860700802X>>. Acesso em: 21/5/2014.

OLSON, G. J.; BRIERLEY, J. A.; BRIERLEY, C. L. **Bioleaching review part B: progress in bioleaching: applications of microbial processes by the minerals industries**. *Applied microbiology and biotechnology*, v. 63, n. 3, p. 249–257, 2003. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14566430>>. Acesso em: 23/5/2014.

ONGONDO, F. O.; WILLIAMS, I. D. **Mobile phone collection, reuse and recycling in the UK**. *Waste management (New York, N.Y.)*, v. 31, n. 6, p. 1307–15, 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X11000675>>. Acesso em: 12/5/2014.

PARK, Y. J.; FRAY, D. J. **Recovery of high purity precious metals from printed circuit boards**. *Journal of hazardous materials*, v. 164, n. 2-3, p. 1152–8, 2009. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18980802>>. Acesso em: 3/2/2014.

PETTER, P. M. H. **Avaliação da Eficiência da Lixiviação de Metais Preciosos das Placas de Circuito Impresso com Utilização de Lixivantes Alternativos ao Cianeto**. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre, RS, 2012.

PNUMA, O. **Economia verde e desenvolvimento sustentável**. 2011.

PORMIN, M. M. E. E. **Beneficiamento de minérios**. Disponível em: <[http://www.pormin.gov.br/biblioteca/arquivo/beneficiamento\\_de\\_minerio.pdf](http://www.pormin.gov.br/biblioteca/arquivo/beneficiamento_de_minerio.pdf)>. Acesso em: 21/4/2014.

POURBAIX, M. **Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions**. 2nd ed. Houston, Texas: National Association of Corrosion Engineers, 1974.

PROCOBRE. **Cobre é material mais amigável para o Meio Ambiente**. Disponível em: <<http://procobre.org/pt/noticias/o-cobre-e-o-material-hidraulico-mais-amigavel-para-o-meio-ambiente/>>. Acesso em: 17/9/2014.

RIBEIRO, J. A. S. **Sumário Mineral 2013**. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/conteudo.asp?IDSecao=68&IDPagina=3165>>. Acesso em: 13/9/2014.

RIBEIRO, J. A. S. **Sumário Mineral 2014**. Disponível em: <[https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra\\_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=9561](https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=9561)>. Acesso em: 28/10/2014.

RON, A.; PENEV, K. **Disassembly and recycling of electronic consumer products: An overview**. *Technovation*, v. 15, n. 6, p. 363–374, 1995. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/016649729596597M>>. Acesso em: 13/6/2014.

SCHUELP, M.; HAGELUEKEN, C.; KUEHR, R.; et al. **Recycling from e-waste to resources**. Disponível em: <[http://www.unep.org/pdf/Recycling\\_From\\_e-waste\\_to\\_resources.pdf](http://www.unep.org/pdf/Recycling_From_e-waste_to_resources.pdf)>. Acesso em: 18/11/2013.

SHAPIRO, M.; GALPERIN, V. **Air classification of solid particles: a review**. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, v. 44, n. 2, p. 279–285, 2005. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0255270104000984>>. Acesso em: 23/5/2014.

SILVEIRA, A. V. M.; FUCHS, M. S.; MEILI, L.; BERTUOL, D. A. **Caracterização e Processamento de Telas de LCD de Celulares visando à Reciclagem**. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, v. 8, n. 8, 2013. Disponível em: <<http://cascavel.ufsm.br/revistas/ojs-2.2.2/index.php/reget/article/view/7314>>. Acesso em: 25/7/2014.

SPEIGHT, J. **Lange's Handbook of Chemistry**. Sixteenth ed. McGraw-Hill Education, 2005.

TELECO. **Número de telefones celulares vendidos no Brasil**. Disponível em: <<http://www.teleco.com.br/celprod.asp>>. Acesso em: 26/4/2014.



- TELLER, M. **Recycling of Electronic Waste Material**. Springer Netherlands, 2006.
- TORRES, V. F. N.; GAMA, C. D. DA. **Engenharia Ambiental Subterrânea e Aplicações**. Rio de Janeiro, 2005.
- TUNCUK, A.; STAZI, V.; AKCIL, A.; YAZICI, E. Y.; DEVECI, H. **Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: Hydrometallurgy in recycling**. *Minerals Engineering*, v. 25, n. 1, p. 28–37, 2012. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0892687511003669>>. Acesso em: 20/2/2014.
- UNITED NATIONS, **World Population Prospects**, The 2012 Revision, DVD Edition. 2013.
- VEIT, H. M. **Emprego do Processamento Mecânico na Reciclagem de Sucatas de Placas de Circuito Impresso**. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre, RS, 2001.
- VEIT, H. M. **Reciclagem de Cobre de Placas de Circuito Impresso**. Tese de Doutorado. Porto Alegre, RS, 2005.
- VEIT, H. M.; PEREIRA, C. C.; BERNARDES, A. M. **Using mechanical processing in recycling printed wiring boards**. *Jom*, v. 54, n. 6, p. 45–47, 2002. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/BF02701850>>.
- VELOSO, Z. M. F. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Disponível em: <[www.comprasgovernamentais.gov.br/arquivos/capacitacao/4-a-responsabilidade-do-setor-publico-frente-a-geracao-de-residuos-solidos.pdf](http://www.comprasgovernamentais.gov.br/arquivos/capacitacao/4-a-responsabilidade-do-setor-publico-frente-a-geracao-de-residuos-solidos.pdf)>. Acesso em: 29/1/2015.
- VOLSKY, A.; SERGIEVSKAYA, E. **Theory of metallurgical processes**. Moscow, 1978.
- WANG, J.; BAI, J.; XU, J.; LIANG, B. **Bioleaching of metals from printed wire boards by *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidithiobacillus thiooxidans* and their mixture**. *Journal of hazardous materials*, v. 172, n. 2-3, p. 1100–1105, 2009. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19699031>>. Acesso em: 23/5/2014.
- WIDMER, R.; OSWALD-KRAPF, H.; SINHA-KHETRIWAL, D.; SCHNELLMANN, M.; BÖNI, H. **Global perspectives on e-waste**. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 25, n. 5, p. 436–458, 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0195925505000466>>. Acesso em: 29/4/2014.
- WILLIAMS, J. H.; WILLIAMS, P. T. **Separation and recovery of materials from scrap printed circuit boards**. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 51, n. 3, p. 691–709, 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344906002643>>. Acesso em: 1/5/2014.
- WU, B. Y.; CHAN, Y. C.; MIDDENDORF, A.; GU, X.; ZHONG, H. W. **Assessment of toxicity potential of metallic elements in discarded electronics: A case study of mobile phones in China**. *Journal of Environmental Sciences*, v. 20, n. 11, p. 1403–1408, 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1001074208622408>>. Acesso em: 21/5/2014.

WU, J.; LI, J.; XU, Z. **Electrostatic separation for multi-size granule of crushed printed circuit board waste using two-roll separator**. Journal of hazardous materials, v. 159, n. 2-3, p. 230–234, 2008. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18346846>>. Acesso em: 18/6/2014.

YAMANE, L. H.; MORAES, V. T. DE; ESPINOSA, D. C. R.; TENÓRIO, J. A. S. **Recycling of WEEE: characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers**. Waste management (New York, N.Y.), v. 31, n. 12, p. 2553–2558, 2011. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21820883>>. Acesso em: 3/2/2014.

YANG, T.; XU, Z.; WEN, J.; YANG, L. **Factors influencing bioleaching copper from waste printed circuit boards by Acidithiobacillus ferrooxidans**. Hydrometallurgy, v. 97, n. 1-2, p. 29–32, 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304386X08003824>>. Acesso em: 23/5/2014.

YAZICI, E.; DEVECI, H.; ALP, I.; AKÇIL, A.; YAZICI, R. **Characterisation of computer PCB for hazardous properties and beneficiation studies**. International Mineral Processing Congress. Anais...v. XXV, p.4009–4015, 2010.

YAZICI, E. Y.; DEVECI, H. **Recovery of metals from E-waste**. The Journal of the Chamber of Mining Engineers of Turkey, v. 48, p. 3–18, 2009.

YOO, J.-M.; JEONG, J.; YOO, K.; LEE, J.-C.; KIM, W. **Enrichment of the metallic components from waste printed circuit boards by a mechanical separation process using a stamp mill**. Waste management (New York, N.Y.), v. 29, n. 3, p. 1132–1137, 2009. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18835149>>. Acesso em: 1/5/2014.

YOVANOVIC, A. P. **Engenharia da Cominuição e Moagem em Moinhos Tubulares**. Disponível em: <<http://modelooperacional.com.br/VisualizadorPublicacoes.aspx?id=14>>. Acesso em: 26/4/2014.

ZHANG, S.; FORSSBERG, E. **Mechanical separation-oriented characterization of electronic scrap**. Resources, Conservation and Recycling, v. 21, n. 4, p. 247–269, 1997. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344997000396>>. Acesso em: 21/5/2014.

ZHANG S.; FORSSBERG, E. **Mechanical recycling of electronics scrap - the current status and prospects**. Waste Management & Research, v. 16, n. 2, p. 119–128, 1998. Disponível em: <<http://wmr.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/0734242X9801600204>>. Acesso em: 20/5/2014.

ZHANG, S.; FORSSBERG, E. **Intelligent Liberation and classification of electronic scrap**. Powder Technology, v. 105, n. 1-3, p. 295–301, 1999. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0032591099001515>>.

ZHANG, S.; FORSSBERG, E.; ARVIDSON, B.; MOSS, W. **Aluminum recovery from electronic scrap by High-Force® eddy-current separators.** Resources, Conservation and Recycling, v. 23, n. 4, p. 225–241, 1998. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344998000226>>. Acesso em: 20/5/2014.

ZHAO, Y.; WEN, X.; LI, B.; TAO, D. **Recovery of cooper from waste printed circuit boards.** Minerals & Metallurgical Processing, v. 21, p. 99–102, 2004.



## ANEXOS

### ANEXO 1 – BOLETIM TÉCNICO IFloc 101 / IFloc 521 BT



**IWT**

Água e Efluentes

## BOLETIM TÉCNICO

### IFloc 101

#### Polieletrólito Aniônico

##### Descrição

**IFloc 101** é um floculante de poliacrilamida aniônico de peso molecular ultra elevado fornecido na forma de um pó granular. É completamente solúvel em água, produzindo soluções de alta viscosidade.

**IFloc 101** tem carga aniônica média.

##### Principais Aplicações

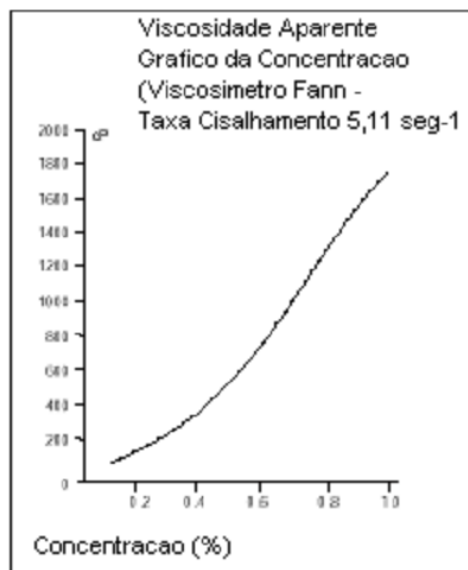
**Ifloc 101** pode ser aplicado em uma grande variedade de operações. É recomendado para uso como coagulante na clarificação primária.

Pode ser também utilizado como um floculante ou coagulante em uma grande linha de aplicações no tratamento de efluentes industriais.

##### Propriedades Típicas

Forma Física  
Granulometria  
Densidade aparente  
pH da solução 1% a 25°C  
Viscosidade a 25°C

Pó granular branco  
98% < 1000  $\mu\text{m}$   
aprox. 0,7 g/cm<sup>3</sup>  
aprox. 6,0  
Veja gráfico



**IWT**

Água e Efluentes

**BOLETIM TÉCNICO****Aplicação & Armazenamento**

Recomendações com relação à concentração das soluções:

Solução tronco 0,25 - 0,5 % máx.

Solução de alimentação 0,025 - 0,1 % máx.

Recomendações com relação aos períodos de armazenamento:

Sólido até dois anos

Solução tronco 1-2 dias

A estocagem de produtos secos e soluções por um período maior que o recomendado pode ser aceito se o estocar de forma correta mas pode resultar em alguma perda na eficiência do produto. A estocagem de sólidos deve ser feita em local seco e fresco e devem ser evitadas condições de alta temperatura e muita umidade. As embalagens devem ser mantidas fechadas quando não estiverem em uso.

Os detalhes com relação à preparação e alimentação podem ser solicitados ao representante da IWT Services Ltda.

**Fornecimento e Manipulação**

**IFloc 101** é fornecido em sacos plásticos com peso líquido de 25 kg. O produto também pode ser fornecido na forma de Big Bags intermediários ou caminhão tanque à granel. Detalhes específicos com relação aos tamanhos dos sacos e tanques podem ser obtidos através de solicitação.

A corrosividade em relação a maioria dos materiais de construção é reduzida, mas devem ser evitados equipamentos de alumínio e galvanizados.

Os resíduos de IFloc 101 devem ser contidos e descartado em acordo com a regulamentação local.

**Saúde e Segurança**

**IFloc 101** mostra uma toxicidade oral muito baixa e não apresenta nenhum problema anormal no seu manuseio.

Informações detalhadas no manuseio ou alguma precaução que deve ser observada no uso do produto descrito neste documento pode ser encontrado na Ficha de Saúde e Segurança.

**Garantia**

**As informações contidas nesta publicação são dadas de boa fé, mas não é assumido nenhum tipo de responsabilidade. Estas informações devem ser consideradas como representando uma especificação para o produto.**

**Representação: IWT Services Ltda.**



---

## **IFloc 521 BT**

### **Polieletrólito Catiônico Líquido**

---

**Descrição**

**IFloc 521 BT** é um polieletrólito líquido de alta carga catiônica. É de baixa viscosidade e pode ser rapidamente bombeado e diluído proporcionando soluções para o uso final.

**IFloc 521 BT** é aprovado pelo Departamento *Drinking Water Inspectorate* do Reino Unido, como seguro para o tratamento de água potável, com a dosagem máxima de 10 mg/litro.

---

**Principais Aplicações**

A principal aplicação para o **IFloc 521 BT** é como um coagulante primário na clarificação de água potável. Quando usado como um coagulante primário **IFloc 521 BT** vai efetivamente reduzir, e em alguns casos, eliminar a necessidade de dosagens de coagulantes inorgânicos convencionais como o sulfato de alumínio e sulfato de ferro.

As áreas de aplicação para o IFloc 521 BT incluem as seguintes:

- Clarificação
- Flotação-Clarificação
- Filtração

A natureza química do produto faz dele efetivo para coagulação numa grande variação de pH.

---

**Propriedades Típicas**

Forma Física	Líquido Âmbar
Gravidade Específica	1,16
Granulometria	50%
Viscosidade 1%	< 20 cPs
pH	aprox. 3,7
Solubilidade em água	Infinitamente solúvel
Ponto de Congelamento	- 7° C

---



**IWT**

Água e Efluentes

## BOLETIM TÉCNICO

---

### Preparação da Solução & Aplicação

Para uso em laboratório as soluções devem ser preparadas com concentração entre 0,25 – 0,5% de polímero ativo com a adição de água para o peso de produto requerido. A mistura da água e do polieletrólito é realizada fácil e rapidamente por agitação mecânica ou simplesmente misturando em um recipiente fechado.

Em um teste em planta, a concentração entre 0,25 – 0,5% de polímero ativo é recomendado para adição ao sistema. Isto é prontamente obtido por ambos lotes se misturados com água em um tanque ou alternativamente, colocando o produto concentrado diretamente no sistema e diluindo em linha. Em alguns casos, uma bomba com característica de resistência a corrosão é recomendada.

Para excelentes resultados, **IFloc 521 BT** deve ser adicionado ao sistema no momento de turbulência suficiente para assegurar uma boa dispersão inicial e uma mistura adequada.

Os detalhes com relação à preparação e alimentação podem ser solicitados ao representante da IWT Services Ltda.

---

### Armazenamento & Estabilidade

**IFloc 521 BT** não diluído apresenta boas características de estabilidade após o armazenamento por 6 meses a 40° C. Sob condições normais de armazenamento, com uma média de 5 a 25° C, o produto ficará estável por no mínimo, 24 meses. Armazenamentos externos sob a média de temperatura acima indicada, por períodos muito extensos, poderá afetar o produto e recomenda-se evitar esta condição, se possível.

É recomendável que a solução estoque a 0,25 – 0,5% seja preparada regularmente para que possam ser utilizadas dentro de 5 dias. Sob este período alguma perda de eficiência poderá ocorrer.

---

### Benefícios do IFloc 521 BT

Entre os principais benefícios do **IFloc 521 BT**, estão:

1. Redução ou eliminação dos coagulantes inorgânicos primários
2. Redução no volume do lodo produzido no sistema
3. Redução no custo no sistema de tratamento
4. Diminuição da sensibilidade do pH no processo de coagulação/flotação

Benefícios adicionais podem ser resultado da redução do trabalho, com a facilidade no manuseio, armazenamento e dosagens do **IFloc 521 BT**.

---

### Propriedades Corrosivas

**IFloc 521 BT** é moderadamente corrosivo sobre superfícies de metais, alumínio, ferro e zinco e sua utilização deve ser evitada.

É recomendado materiais de construção para os tanques de armazenamento, tanques de diluição, etc., incluindo, fibra de vidro, polietileno e polipropileno.

---

### Embalagens

A embalagem padrão do **IFloc 521 BT** é bombona plástica de 200 kg. Todas as embalagens são retornáveis. Detalhes em relação a outras embalagens, contate nossos representantes.

---





**IWT**

Água e Efluentes

## BOLETIM TÉCNICO

---

<b>Resíduos</b>	<p>Os resíduos de IFloc 521 BT devem ser contidos e descartados de acordo com as regulamentações locais.</p> <p>Devem ser evitados os descartes do produto ou soluções no curso da água, porque <b>IFloc 521 BT</b> pode seriamente afetar as mucosas dos peixes.</p>
<b>Assistência Técnica</b>	<p>A assistência técnica completa está implícita na comercialização do <b>IFloc 521 BT</b>. Incluindo assistência na definição do produto, testes laboratoriais e testes em planta.</p>
<b>Saúde e Segurança</b>	<p><b>IFloc 521 BT</b> tem baixa toxicidade e não requer cuidados anormais em seu manuseio.</p> <p>Informações detalhadas no manuseio ou alguma precaução que deve ser observada no uso do produto descrito neste documento pode ser encontrado na Ficha de Saúde e Segurança.</p>
<b>Garantia</b>	<p><b>As informações contidas nesta publicação são dadas de boa fé, mas não é assumido nenhum tipo de responsabilidade. Estas informações devem ser consideradas como representando uma especificação para o produto.</b></p>

---

**Representação: IWT Services Ltda.**



## ANEXO 2 – FICHAS DE IDENTIFICAÇÃO DAS ESPÉCIES

- Ficha do Ni

04-0850		Wavelength= 1.5405			
Ni	2 $\theta$	Int	h	k	l
Nickel	44.505	100	1	1	1
	51.844	42	2	0	0
	76.366	21	2	2	0
Nickel, syn	92.939	20	3	1	1
	98.440	7	2	2	2
Rad: CuK $\alpha$ 1: 1.5405 Filter: Ni Beta d-sp:	121.822	4	4	0	0
Cut off: Int.: Diffract. I/Corr.:	144.855	14	3	3	1
Ref: Swanson, Teige, Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, I, 13 (1953)	155.832	15	4	2	0
<hr/>					
Sys: Cubic	S.G.: Fm $\bar{3}$ m (225)				
a: 3.5238	b:	c:	A:	C:	
$\alpha$ :	$\beta$ :	$\gamma$ :	Z: 4	mp:	
Ref: Ibid.					
<hr/>					
Dx: 8.911	Dm:		SS/FOM: F g = 87(.0115 , 8)		
Color: White					
Pattern taken at 26 C. Sample obtained from Johnson Matthey Company, Ltd. CAS #: 7440-02-0. Spectrographic analysis show <0.01% each of Mg, Si and Ca. Cu type. Gold SuperGroup, 1C-disordered Group. PSG: cF4. See KSD 64689 (PDF 87-712). Mwt: 58.70. Volume(CD): 43.76.					

 . 2001 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 2.2

- Ficha do Cu

04-0836		Wavelength= 1.5405			
Cu	2 $\theta$	Int	h	k	l
Copper	43.285	100	1	1	1
	50.431	46	2	0	0
	74.127	20	2	2	0
Copper, syn	89.926	17	3	1	1
	95.135	5	2	2	2
Rad: CuK $\alpha$ 1: 1.5405 Filter: Ni Beta d-sp:	116.911	3	4	0	0
Cut off: Int.: Diffract. I/Corr.:	136.496	9	3	3	1
Ref: Swanson, Teige, Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, I, 15 (1953)	144.70	8	4	2	0
<hr/>					
Sys: Cubic	S.G.: Fm $\bar{3}$ m (225)				
a: 3.6150	b:	c:	A:	C:	
$\alpha$ :	$\beta$ :	$\gamma$ :	Z: 4	mp: 1083	
Ref: Ibid.					
<hr/>					
Dx: 8.935	Dm: 8.950		SS/FOM: F g = 86(.0112 , 8)		
Color: Red					
Pattern taken at 26 C. Sample from metallurgical laboratory of NBS, Gaithersburg, Maryland, USA. CAS #: 7440-50-8. It had been heated in an H $_2$ atmosphere at 300 C. Impurities from 0.001-0.01%, Ag, Al, Bi, Fe, Si, Zn. Measured density and color from Dana's System of Mineralogy, 7th Ed., 199. Cu type. Gold SuperGroup, 1C-disordered Group. PSG: cF4. See KSD 64689 (PDF 85-1326). Opaque mineral optical data on specimen from unspecified locality. RSRZ=62.85, Disp.=Std. VHN100=96-104. Mwt: 63.55. Volume(CD): 47.24.					

 . 2001 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 2.2

- Ficha do Au

04-0784		Wavelength= 1.54056			
Au	2 $\theta$	Int	h	k	l
Gold	38.184	100	1	1	1
	44.392	52	2	0	0
	64.576	32	2	2	0
Gold, syn	77.547	36	3	1	1
	81.721	12	2	2	2
Rad.: CuK $\alpha$	Filter: Ni	Beta	d-sp:		
Cut off:	Int: Diffract.	I/keor:			
Ref: Swanson, Tøtge, Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, I, 33 (1953)					
Sys: Cubic	S.G.: Fm $\bar{3}$ m (225)				
a: 4.0786	b:	c:	A:	C:	
$\alpha$ :	$\beta$ :	$\gamma$ :	Z: 4	mp: 1061.6-1063.2	
Ref: Ihd.					
Dx: 19.283	Dm: 19.300	SS/FOM: F g = 125(.0078 . 9)			
$\mu$ :	$\eta$ : 0.366	$\nu$ :	Slm:	ZV:	
Ref: Winchell, Elements of Optical Mineralogy, 17					
Color: Yellow metallic					
Pattern taken at 25 C. Sample purified at NBS, Gaithersburg, Maryland, USA and is about 99.997% Au. CAS #: 7440-57-5.					
Spectrographic analysis (%): Si 0.001, Ca 0.001, Ag 0.001(?). Opaque mineral optical data on specimen from unspecified locality.					
RE2Rc=71.6, Disp.=16, VHN100=53-58, Color values=.384, .391, 72.7. Ref.: IMA Commission on Ore Microscopy QDF. Cu type. Gold SuperGroup, 1C-disordered Group. PSC: cF4. Optical data reference: Winchell, Elements of Optical Mineralogy, 17.					
Structural reference: Winchell, Elements of Optical Mineralogy, 17. Mwt: 196.97. Volume[CD]: 67.85.					



© 2001 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 2.2

- Ficha de Al

04-0787		Wavelength= 1.54056			
Al	2 $\theta$	Int	h	k	l
Aluminum	38.472	100	1	1	1
	44.758	47	2	0	0
	65.133	22	2	2	0
Aluminum, syn	78.227	24	3	1	1
	82.435	7	2	2	2
Rad.: CuK $\alpha$	Filter: Ni	Beta	d-sp:		
Cut off:	Int: Diffract.	I/keor:	3.62		
Ref: Swanson, Tøtge, Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, I, 11 (1953)					
Sys: Cubic	S.G.: Fm $\bar{3}$ m (225)				
a: 4.0494	b:	c:	A:	C:	
$\alpha$ :	$\beta$ :	$\gamma$ :	Z: 4	mp:	
Ref: Ihd.					
Dx: 2.698	Dm:	SS/FOM: F g = 83(.0108 . 9)			
Color: Light gray metallic					
Pattern taken at 25 C. CAS #: 7429-90-5. The material used for the NBS sample was a melting point standard sample of aluminum prepared at NBS, Gaithersburg, Maryland, USA. The chemical analysis (%): Si 0.011, Cu 0.006, Fe 0.007, Ti 0.0001, Zr 0.003, Ga 0.004, Mo 0.00002, S 0.0001, Al 99.9+ (by difference). Mineral species of doubtful validity, Am. Mineral., 65: 205 (1980). Cu type. Gold SuperGroup, 1C-disordered Group. PSC: cF4. See KSD 64700 (PDF 85-1327). Mwt: 26.98. Volume[CD]: 66.40.					



© 2001 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 2.2

- Ficha do CuO

78-0428		Wavelength= 1.54060				C
CuO	2 <sub>e</sub>	Int	h	k	l	
Copper Oxide	36.637	769	1	1	1	
	42.559	999*	2	0	0	
	61.761	450	2	2	0	
	74.00	171	3	1	1	
	77.893	109	2	2	2	
Rad.: CuKα1 λ: 1.54060 Filter: d-sp: Calculated						
Cut off: 17.7 Int.: Calculated I/ICor.: 5.43						
Ref: Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997)						
Ref: Schmahl, N.G., Eikerling, G.F., Z. Phys. Chem. Neue Folge. (Wiesbaden), 62, 268 (1968)						
Sys.: Cubic S.G.: Fm $\bar{3}$ m (225)						
a: 4.245(5)	b:	c:	A:	C:		
α:	β:	γ:	Z: 4	mp:		
Ref: Ibid.						
Dx: 6.907 Dm: ICSD #: 061323						
Peak height intensity. Cu O type. PSC: cF8. No R value given. At least one TF missing. Structural reference: Schmahl, N.G., Eikerling, G.F., Z. Phys. Chem. Neue Folge. (Wiesbaden), 62, 268 (1968). Mwt: 79.55. Volume[CD]: 76.49.						

 . 2001 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 2.2

- Ficha do Fe

06-0696		Wavelength= 1.5405				*
Fe	2 <sub>g</sub>	Int	h	k	l	
Iron	44.671	100	1	1	0	
	65.018	20	2	0	0	
	82.329	30	2	1	1	
Iron, syn	98.940	10	2	2	0	
	116.378	12	3	1	0	
	137.125	6	2	2	2	
Rad.: CuKα1 λ: 1.5405 Filter: Ni Beta d-sp:						
Cut off: Int.: Diffract. I/ICor.:						
Ref: Swanson et al., Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, IV, 3 (1955)						
Sys.: Cubic S.G.: Im $\bar{3}$ m (229)						
a: 2.8664	b:	c:	A:	C:		
α:	β:	γ:	Z: 2	mp:		
Ref: Ibid.						
Dx: 7.875 Dm: SS/FOM: F g = 22*(.0044 , 6)						
Color: Gray, light gray metallic Pattern taken at 25 C. CAS #: 7439-89-6. The iron used was an exceptionally pure rolled sheet prepared at the NBS, Gaithersburg, Maryland, USA. [Moore, G., J. Met., 5 1443 (1953)]. It was annealed in an He atmosphere for 3 days at 1100 C and slowly cooled in a He atmosphere. Total impurities of sample <0.0012% each metals and non-metals. γ-Fe (fcc)=(1390 C) δ-Fe (bcc). Opaque mineral optical data on specimen from Meteorite: RR2Re= 57.7, Disp.=16, VHN=158 (mean at 100, 200, 300), Color values=.311, .316, 57.9, Ref.: IMA Commission on Ore Microscopy Q11F. W type. Iron SuperGroup, 1C-disordered Group. Also called: ferrite. PSC: cE. See KSD 64795 (PDF 85-1410). Mwt: 55.85. Volume[CD]: 23.55.						

 . 2001 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 2.2

- Ficha do Pb

04-0696		Wavelength= 1.54056				
Pb		$d_0$	Int	h	k	l
Lead		31.305	100	1	1	1
		36.266	50	2	0	0
		52.228	31	2	2	0
Lead, syn		62.119	32	3	1	1
		65.236	9	2	2	2
Rad: CuK $\alpha$	$\lambda$ : 1.54056	Filter: Ni	Beta	d-sp:		
		76.954	2	4	0	0
Cut off:	Int: Diffract.	85.394	10	3	3	1
	I/ICor:	88.196	7	4	2	0
Ref: Swanson, <i>Talge</i> , <i>Natl. Bur. Stand. (U.S.)</i> , Circ. 539, 1, 34 (1953)		99.331	6	4	2	2
		107.630	5	5	1	1
		123.313	1	4	4	0
		133.968	9	5	3	1
		137.953	4	6	0	0
Syn: Cubic		S.G.: Fm $\bar{3}$ m (225)				
a: 4.9506	b:	c:	A:	C:		
$\alpha$ :	$\beta$ :	$\gamma$ :	Z: 4	mp:		
Ref: <i>Ibid.</i>						
Dx: 11.343	Dm: 11.365	SS/POM: F13 = 0E(.0148 . 13)				
Color: Light gray metallic						
Pattern taken at 26 C. Sample obtained from American Smelting and Refining Company. CAS #: 7439-92-1. It was annealed for 1 hour and 160 C in petrolatum. Spectrographic analysis shows faint traces of Bi and Mg. Purity >99.999%. Cu type. Gold SuperGroup, IC-disordered Group. PSC: cF4. Mwt: 207.20. Volume[GB]: 121.33.						

. 2001 ICDD—International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 2.2