

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais  
PPGE3M

**MONITORES DE LCD: CARACTERIZAÇÃO DOS  
MATERIAIS E PROCESSAMENTO MECÂNICO DAS  
PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Química Industrial Nichele Cristina de Freitas Juchneski

Orientador: Prof. Dr. Hugo Marcelo Veit

Porto Alegre, maio de 2013.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais  
PPGE3M

**MONITORES DE LCD: CARACTERIZAÇÃO DOS  
MATERIAIS E PROCESSAMENTO MECÂNICO DAS  
PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO**

Química Industrial Nichele Cristina de Freitas Juchneski

Orientador: Dr. Hugo Marcelo Veit

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Daniel Assumpção Bertuol – UFSM/PPGEPro

Prof. Dr. Luis Henrique Alves Cândido – UFRGS/PGDesign

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Jane Zoppas Ferreira – UFRGS/PPGE3M

Trabalho realizado no Departamento de Materiais da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre, maio de 2013.

*Dedico esta conquista aos meus pais, Admir e Irene, à  
minha irmã, Alexia, à minha vó Theresa e ao meu namorado,  
Erich. Sem vocês este trabalho não seria possível.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que de alguma forma colaboraram para a realização deste trabalho.

Ao professor Hugo Marcelo Veit, que aceitou me orientar, dando-me apoio e auxílio, tornando este trabalho possível, contribuindo enormemente para o meu crescimento;

Aos demais professores do Lacor/UFRGS pelas sugestões e contribuições;

Ao professor Carlos Hoffman Sampaio, que me ajudou muito na realização deste trabalho;

À Inês Grochau pela imensa ajuda nas análises de FTIR;

Ao Erich pela compreensão e paciência, mesmo nos finais de semana passados no Lacor;

Ao LdSM/UFRGS e pela ajuda nas análises de FTIR e MEV/EDS;

Ao Lacar/ UFRGS, em especial ao Wilbur pela ajuda na utilização do microscópio óptico;

Ao Laprom/UFRGS, em especial ao Gerson Miltzarek pela ajuda nos ensaios realizados;

Ao professor Marco Antônio Siqueira Rodrigues pelas análises de absorção atômica;

Às colegas Daniela e Patrícia pelas inúmeras análises de absorção atômica, e à Tatiane pelas análises de cromatografia iônica;

Ao Tiago e a Gustavo pelas análises de MEV/EDS;

À todos os funcionários do Lacor/ UFRGS pelo auxílio prestado;

Às bolsistas Janine e Bruna pelo auxílio na realização do trabalho;

Ao CNPQ pela bolsa concedida;

À todos os colegas do Lacor/ UFRGS, especialmente aos colegas da Sala 103, pelo apoio nas adversidades e amizade.

# ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	III
ÍNDICE.....	IV
LISTA DE FIGURAS .....	VI
LISTA DE TABELAS .....	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS.....	IX
RESUMO .....	XII
ABSTRACT .....	XIII
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	5
2.1 Objetivo Geral.....	5
2.2 Objetivos Específicos.....	5
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	6
3.1 Telas de LCD .....	6
3.1.1 Funcionamento do LCD .....	6
3.1.2 Cristal Líquido.....	9
3.1.3 Vidro.....	11
3.1.4 Polarizador.....	11
3.2 Placas de Circuito Impresso .....	12
3.3 Legislação .....	15
3.4 Caracterização de Resíduos Sólidos.....	16
3.5 Processos de Reciclagem .....	18
3.5.1 Pirometalurgia .....	19
3.5.2 Hidrometalurgia.....	21
3.5.3 Eletrometalurgia .....	23
3.5.4 Processos Mecânicos .....	25
3.6 Processos Mecânicos.....	25
3.6.1 Cominuição.....	25
3.6.2 Classificação .....	26
3.6.3 Separação Magnética.....	26
3.6.4 Separação Eletrostática.....	27
3.6.5 Separação Gravimétrica.....	29
3.6.5.1 Suspensões.....	29

3.6.5.2 Jigues .....	34
3.6.3.3 Líquidos Densos .....	36
3.6.3.4 Filmes de Água.....	38
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
4.1 Caracterização de Monitores/Telas de LCD .....	44
4.1.1 Caracterização das Carcaças Poliméricas Externas.....	46
4.1.2 Caracterização das Telas de LCD.....	46
4.1.3 Caracterização das Placas de Circuito Impresso .....	48
4.1.4 Caracterização quanto a periculosidade .....	51
4.2 Processamento Mecânico das Placas de Circuito Impresso.....	53
4.2.1 Separação em Meio Denso .....	54
4.2.2 Ensaio no Concentrador Mozley.....	55
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	59
5.1 Caracterização das Telas/Monitores de LCD.....	59
5.1.1 Caracterização das Carcaças Poliméricas Externas.....	61
5.1.2 Caracterização das Telas de LCD.....	62
5.1.3 Caracterização das Placas de Circuito Impresso .....	72
5.1.4 Caracterização da Periculosidade dos Resíduos.....	73
5.2 Processamento Mecânico das Placas de Circuito Impresso.....	75
5.2.1 Meio Denso .....	75
5.2.2 Concentrador Mozley .....	77
6 CONCLUSÕES.....	88
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	91

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura da Tela de LCD. <sup>0</sup> .....	7
Figura 2: Formação da Imagem em uma Tela de LCD. Adaptado de plasma.com. <sup>0</sup> .....	8
Figura 3: Representação das Fases Sólida, Líquido-Cristalina e Líquida. <sup>0</sup> .....	9
Figura 4: Mesofase Nemática e Mesofase Colestérica. <sup>(26)</sup> .....	10
Figura 5: Passagem de Luz em um Filtro Polarizador. ....	12
Figura 6: Histórico de Preço para 28,35g (1 onça) de Ouro nos Meses de Dezembro. <sup>0</sup> .....	15
Figura 7: Histórico de Preço para 28,35g (1 onça) de Prata nos Meses de Dezembro. <sup>(55)</sup> .....	15
Figura 8: Fluxograma Esquemático dos Processos Possíveis para a Recuperação de Materiais. Adaptado de Tuncuk et al. <sup>0</sup> .....	19
Figura 9: Diagrama esquemático de um separador eletrostático <sup>(86)</sup> .....	28
Figura 10: Formas de Alimentação em Separadores Estáticos. <sup>(88)</sup> .....	31
Figura 11: Diagrama Esquemático de um Ciclone <sup>(88)</sup> .....	32
Figura 12: Separador Dynawhirlpool. <sup>(88)</sup> .....	33
Figura 13: Jigue Batac. <sup>(88)</sup> .....	35
Figura 14: Jigue Harz. Adaptado de Fuerstenau et al <sup>0</sup> .....	36
Figura 15: Mesa Concentradora Wilfley. <sup>(94)</sup> .....	39
Figura 16: Arranjo Típico das Partículas <sup>(88)</sup> .....	40
Figura 17: Separador Mozley <sup>(88)</sup> .....	41
Figura 18: Modo de Operação do Separador Mozley. Adaptado de Burt <sup>(90)</sup> .....	42
Figura 19: Fluxos Dentro de uma Espiral <sup>(88)</sup> .....	43
Figura 20: Esquema de um Monitor de LCD. ....	46
Figura 21: Camadas Poliméricas.....	47
Figura 22: Fases das Camadas Poliméricas.....	47
Figura 23: Moinho de Martelos.....	48
Figura 24: Moinho de Facas.....	49
Figura 25: Fluxograma com as frações utilizadas para caracterizar as PCI. ....	50
Figura 26: Etapas do ensaio de lixiviação - NBR 10005. ....	51

Figura 27: Agitador tipo Wagner .....	52
Figura 28: Etapas do ensaio de lixiviação NBR 10006.....	52
Figura 29: Fluxograma da Rota 1 do Ensaio com Concentrador Mozley. ....	56
Figura 30: Fluxograma da Rota 2 do Ensaio com Concentrador Mozley. ....	56
Figura 31: Fluxograma da Rota 3 do Ensaio com Concentrador Mozley. ....	56
Figura 32: Monitor Desmontado.....	60
Figura 33: Espectro do PET de uma folha reflexiva.....	63
Figura 34: Espectro do PC de um perspex.....	64
Figura 35: Espectro do poli(metacrilato de metila) de uma folha difusora.....	64
Figura 36: Espectro da Película polimérica (a).....	66
Figura 37: Espectro da Película Polimérica (b).....	66
<b>Figura 38: Espectro da Película polimérica (c).....</b>	<b>67</b>
Figura 39: Figura do Vidro Posterior de uma Tela de LCD - Camada TFT. ....	68
Figura 40: Figura do Vidro Posterior de uma Tela de LCD - Camada TFT em Detalhes. ....	69
Figura 41: Figura do Vidro Dianteiro de uma Tela de LCD Mostrando Pixels - lado em contato com o Filme Polimérico.....	69
Figura 42: Figura do Vidro Dianteiro de uma Tela de LCD - lado em contato com o Cristal Líquido. ....	70
Figura 43: MEV/EDS da tela de LCD - camada dianteira, face interna. ....	70
Figura 44: MEV/EDS da tela de LCD - camada posterior face interna. ....	71
Figura 45: Distribuição das Frações Metálicas e Não Metálicas no Ensaio em Meio Denso. ....	76
Figura 46: Distribuição dos Metais nas Frações Afundado e Flutuado.....	76
Figura 47: Distribuição dos Metais no Ensaio de Meio Denso.....	77
Figura 48: Ensaio Preliminares Realizados no Concentrador Mozley com 3 amostras distintas, onde A é a fração concentrada, B é a fração mista e C é a fração leve.....	78
Figura 49: Resultados do Teor de Metais e Não Metais no Ensaio no Concentrador Mozley da Amostra 4.....	79
Figura 50: Fluxograma Esquemático do Processo para a Concentração de Metais Utilizando Separação por Densidade.....	87



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição de Placas de Circuito Impresso segundo diversos autores. ....	13
Tabela 2: Concentrações Máximas Apresentadas nos Anexos F e G da NBR 10004 <sup>(59)</sup> .....	18
Tabela 3: Constantes de Estabilidade de Cianocomplexos <sup>(71)</sup> .....	22
Tabela 4: Líquidos Densos Empregados em Ensaios de Afunda-Flutua e suas Respectivas Densidades <sup>(88, 89)</sup> .....	38
Tabela 5: Monitores e Telas Utilizadas.....	45
Tabela 6: Densidade de Materiais Presentes nas PCI.....	55
Tabela 7: Parâmetros utilizados nos ensaios com o concentrador Mozley utilizando PCI genéricas...	57
Tabela 8: Parâmetros utilizados nos ensaios com o concentrador Mozley utilizando PCI provenientes de LCD.....	58
Tabela 9: Massa dos componentes presentes em um monitor.....	61
Tabela 10: Resultado das análises de FTIR nas camadas poliméricas internas dos monitores.....	62
Tabela 11: Resultado das análises de FTIR para Películas Poliméricas. ....	65
Tabela 12: Resultados da FRX para Óxidos encontrados na Tela de Vidro. ....	72
Tabela 13: Metais Presentes em PCI de LCD com granulometria -1,00+0,25mm. ....	72
Tabela 14: Metais Presentes em PCI de LCD com granulometria <0,25mm. ....	73
Tabela 15: Resultado da análise do material lixiviado de acordo com a NBR 10005. ....	74
Tabela 16: Resultado da análise de ICP-AES do ensaio de solubilização. ....	74
Tabela 17: Recuperação (%) de Metais da Amostra 4 em cada uma das Frações. ....	79
Tabela 18: Resultados dos Ensaios no Concentrador Mozley para as amostras 5, 6 e 7. ....	80
Tabela 19: Distribuição de Metais e Não Metais em cada uma das Frações.....	80
Tabela 20: Distribuição de Metais das Amostras 5 e 6 em cada uma das Frações. ....	81
Tabela 21: Resultados dos Ensaios no Concentrador Mozley com PCI de LCD.....	83
Tabela 22: Distribuição de Metais nos Ensaios com Concentrador Mozley para PCI de LCD. ....	84

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica

ABS – Acrilonitrila-Butadieno-Estireno

Ag - Prata

Ag<sup>+</sup> - Íon Prata

Al - Alumínio

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Óxido de Alumínio

As<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Trióxido de Arsênio

Au - Ouro

Au<sup>+</sup> - Íon Ouro

CaCl<sub>2</sub> – Cloreto de Cálcio

CaO – Óxido de Cálcio

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral

Cl - Cloro

CO – Monóxido de Carbono

Co<sup>+3</sup> – Íon Cobalto

CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono

Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Óxido de Cobalto

Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Óxido de Cromo

CRT – Tubo de Raios Catódicos

Cu - Cobre

Cu<sup>+</sup> - Íon Cobre

CuO – Óxido de Cobre

EEE – Equipamento Eletro Eletrônico

AAS - Espectroscopia de Absorção Atômica

Fe - Ferro

Fe<sup>2+</sup> - Íon Ferro II

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Óxido de Ferro

Fe<sup>3+</sup> - Íon Ferro III

FRX – Fluorescência de Raio X

FTIR – Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier

g - Grama

g/cm<sup>3</sup> - Grama por centímetro cúbico

H<sub>2</sub> – Molécula de hidrogênio  
H<sub>2</sub>O – Molécula água  
HCl – Ácido Clorídrico  
ICP-AES – Espectroscopia de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente  
In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Óxido de índio  
ITO – Óxido de índio e estanho  
Kg - quilograma  
Kg/h – quilograma por hora  
L/min – Litros por minuto  
LCD – Liquid Crystal Display  
LED - Diodo emissor de luz  
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura  
MEV/EDS - Microscopia eletrônica de varredura com espectroscopia de energia dispersiva  
Mg – Miligrama  
Mg/cm<sup>2</sup> - Miligrama por centímetro quadrado  
Mg/L - Miligrama por litro  
MIT – Material Intensity  
mm – Milímetro  
MnO – Óxido de Manganês  
MoO<sub>3</sub> - Trióxido de molibdênio  
NaCl – Cloreto de Sódio  
NaOH – Hidróxido de Sódio  
NBR – Norma Brasileira  
Ni - Níquel  
Ni<sup>2+</sup> - Íon Níquel  
NiO – Óxido de Níquel  
P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – Pentóxido de Fósforo  
P.A. – Para Análise  
Pb - Chumbo  
PBB – Bifenilos Polibromados  
PBDE – Éter Difenil Polibromado  
PC - Policarbonato  
PCI – Placa de Circuito Impresso

Pd - Paládio  
pH – Potencial de Hidrogênio  
PMMA – Poli(metacrilato de metila)  
PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos  
ppm – Parte por milhão  
PVC – Poli(cloreto de vinila)  
Rb<sub>2</sub>O – Óxido de Rubídio  
REEE – Resíduo Eletroeletrônico  
RoHS - Restriction of Hazardous Substances Directive  
SiO<sub>2</sub> – Dióxido de Silício  
SnO<sub>2</sub> – Dióxido de Estanho  
SO<sub>3</sub> – Trióxido de Enxofre  
SrO – Óxido de Estrôncio  
TBE – Tetrabromoetano  
TFT – Thin Film Transistor  
WEEE – Waste Electrical and Electronic Equipment  
Zn - Zinco  
Zn<sup>2+</sup> - Íon Zinco  
ZnCl<sub>2</sub> – Cloreto de Zinco

## RESUMO

Dentre os setores mais promissores da indústria está o setor de equipamentos eletroeletrônicos. Parte destes equipamentos eletroeletrônicos apresentam componentes tóxicos podendo causar danos ao meio ambiente e a população e apresentam também materiais nobres e raros que, caso não reciclados correm o risco de desaparecer nas próximas gerações. Alguns desses equipamentos já possuem rotas de reciclagem definidas, no entanto novas tecnologias como a tela de cristal líquido (LCD) estão começando a sofrer os primeiros descartes.

Os monitores de LCD são compostos por uma tela de LCD, partes poliméricas e placas de circuito impresso (PCI) que são componentes de composição muito heterogênea, sendo 70% da sua massa composta de frações não metálicas e 30% correspondem a metais como cobre, chumbo, ferro, níquel, ouro e prata.

Neste trabalho, monitores e telas de LCD danificados foram coletados em assistências técnicas. Estes foram desmontados e caracterizados quanto a sua estrutura, composição e periculosidade. As placas de circuito impresso foram cominuídas a granulometrias específicas e caracterizadas quanto a quantidades de metais presentes. Posteriormente, estas placas foram submetidas a ensaios de separação gravimétrica com líquidos densos e com um concentrador Mozley.

Os monitores têm suas partes poliméricas compostas principalmente por termoplásticos como PC, PET, ABS e acrílico exceto nas placas de circuito impresso, onde a fração polimérica é composta por resina epóxi. A tela de vidro, fração cerâmica, foi caracterizada por FRX e MEV/EDS, sendo observada a presença de metais como índio, estanho, cobre e alumínio, todos na forma de óxido. As PCI após serem cominuídas e classificadas foram submetidas a ensaio em meio denso a fim de determinar qual granulometria apresenta melhor grau de liberação, sendo escolhido o tamanho de partícula  $-1,0+0,25\text{mm}$ . As frações afundado e flutuado foram caracterizadas através de lixiviação com água régia e posterior análise por FAAS e ICP-AES. Nos ensaios realizados com o concentrador Mozley, variando parâmetros como inclinação da bandeja, vazão de água e tempo, os resultados obtidos mostram que é possível concentrar metais nobres como ouro (92%), prata (94%) e cobre (88%) em uma fração com um baixo teor de não metais.

Palavras-chave: LCD, Caracterização, PCI, Processamento Mecânico

## **ABSTRACT**

Among the most promising sectors of the industry is that of electronic equipment. Part of these electronic equipments has toxic components, which can cause damage to the environment and population and also have rare and precious materials which, if not recycled they are at risk of disappearing in the next generations. Some of these devices already have recycling routes defined; however, new technologies such as liquid crystal display (LCD) are starting to suffer the first discard.

The LCD monitors are composed of an LCD screen, polymeric parts and printed circuit boards (PCB) which are components with a very heterogeneous composition, being 70% of its mass consisting of non-metallic fractions and 30% are metals such as copper, lead, iron, nickel, gold and silver.

In this work, LCD monitors and screens were collected in technical assistance. These were dismantled and characterized for their structure, composition and dangerousness. The printed circuit boards were comminuted to specific particle sizes and characterized for their amounts of metals present. Later, these boards were analyzed by gravimetric separation with dense liquids and Mozley concentrator.

The monitors have their polymeric parts mainly composed of thermoplastics such as PC, PET, ABS and acrylic except for printed circuit boards, where the polymeric fraction is composed of epoxy resin. The screen glass, ceramic fraction, was characterized by XRF and SEM / EDS, showing the presence of metals such as indium, tin, copper and aluminum, all in oxide form. The PCI after being comminuted and classified were realized assays in dense medium to determine which granulometry provides a better degree of particle release, being chosen particle size  $-1.0 +0.25$  mm. The sunk and floated fractions were characterized by leaching with aqua regia and subsequent analysis by FAAS and ICP-AES. For assays realized with the concentrator Mozley, varying parameters such as tilt tray, water flow and time, the results show that it is possible to concentrate noble metals like gold (92%), silver (94%) and copper (88%) in a fraction with a low content of non-metals.

Keywords: LCD, Characterization, PCB, Mechanical Processing.

# 1 INTRODUÇÃO

Dentre os setores mais promissores da indústria está o setor de equipamentos eletroeletrônicos. O aumento do consumo destes materiais e a falta de uma destinação adequada acarretam em sérias consequências econômicas e ambientais. A complexidade deste problema justifica a criação de leis específicas em vigor em diversas partes do mundo.

A diretiva 2002/95/EC que trata a respeito das Restrições de Substâncias Perigosas (RoHS), adotada pela União Europeia, proíbe que determinadas substâncias perigosas sejam utilizadas em processos de fabricação de produtos eletroeletrônicos e ainda a diretiva 2002/96/CE que dispõe sobre o recolhimento e reciclagem destes equipamentos. O objetivo destas diretivas é aumentar a reciclagem e o reuso de equipamentos eletrônicos e ainda fazer com que metais pesados como: chumbo, mercúrio, cádmio e cromo hexavalente e substâncias como retardantes de chamas com bifenilos polibromados (PBBs), éteres difenil-polibromados (PBDEs) sejam substituídos por substâncias mais seguras<sup>(1,2)</sup>.

No Brasil, em agosto de 2010, foi instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) baseada dos conceitos de: responsabilidade compartilhada, logística reversa e ciclo de vida do produto. Entre os objetivos desta lei está a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como: disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos e a redução do volume e da periculosidade dos resíduos sólidos. Ainda, de acordo com PNRS os fabricantes, importadores, distribuidores e vendedores são responsáveis pelo recolhimento de pilhas, baterias, lâmpadas e equipamentos eletrônicos, ou seja, os fabricantes são responsáveis pelo fim de vida dos seus produtos e os vendedores devem receber do consumidor estes produtos no seu final de vida<sup>(3)</sup>. Esta política tem entre seus objetivos o incentivo à indústria da reciclagem e o desenvolvimento de processos que busquem padrões sustentáveis de produção e de consumo de bens e serviços.

Desta forma, este trabalho contribui para a efetiva aplicação da PNRS, pois possibilita o aumento do conhecimento frente aos materiais presentes em equipamentos eletroeletrônicos, além de estudar alternativas de processos para a reciclagem destes equipamentos danificados e/ou obsoletos.

Parte destes equipamentos eletroeletrônicos apresentam componentes tóxicos, podendo causar danos ao meio ambiente e a população; e apresentam também materiais nobres e raros que quando não reciclados, correm o risco de desaparecer nas próximas gerações.

Dentre os equipamentos eletroeletrônicos podemos citar: televisores, monitores, celulares, computadores, impressoras e placas de circuito impresso (presente em todos os equipamentos citados anteriormente); além dos grandes aparelhos como: fogões, geladeiras, lavadoras de roupas, secadoras, fornos de micro-ondas e freezers, também conhecidos como produtos de linha branca. Alguns desses equipamentos já possuem rotas de reciclagem definidas; no entanto, novas tecnologias como a tela de cristal líquido (LCD) estão começando a sofrer os primeiros descartes.

O uso de equipamentos como: computadores, celulares e dispositivos de entretenimento vêm aumentando anualmente as taxas alarmantes mundialmente, assim como o seu descarte. Em 1994, estima-se que 20 milhões de computadores tornaram-se obsoletos e em 2004 estima-se que este número chegue a 100 milhões de peças. Entre os anos de 1994 e 2003, em torno de 500 milhões de computadores foram descartados, o que significa que 2.872.000 toneladas de plástico, 718.000 toneladas de chumbo, 1.363 toneladas cádmio e 287 toneladas de mercúrio foram descartados <sup>(4)</sup>.

No Brasil, segundo estudos das Nações Unidas <sup>(5)</sup>, anualmente são gerados 96 mil toneladas de sucata eletrônica proveniente apenas de computadores, o que faz do Brasil o maior gerador de sucata eletrônica entre os países emergentes. Bandini <sup>(6)</sup> estima que apenas 1,92 mil toneladas da sucata eletrônica gerada é reciclada no país, ou seja, mais de 94 mil toneladas tem um fim de vida desconhecido, sendo muitas vezes inadequado, podendo causar a contaminação do solo e da água em função da presença de materiais tóxicos.

As telas de LCD, foco deste trabalho, são utilizadas em diversos equipamentos como: celulares, monitores, televisores, calculadoras, câmeras digitais, entre outros. Estima-se que em 2005, cerca de 40.000 toneladas de componentes de telas de cristal líquido tenham sido descartadas na Europa, o que representou 2% do total de resíduos eletrônicos descartados <sup>(7)</sup>. Em países emergentes como o Brasil, o aumento contínuo das vendas de televisores e monitores de LCD é devido à substituição da tecnologia de tubos de raios catódicos (CRT) e nos próximos anos essa estimativa de crescimento deve manter-se. Logo ocorrerá também o aumento do descarte destes produtos.

Em relação a 2009, que foi considerado um ano atípico em função da crise econômica, estimou-se que a venda de televisores de LCD sofreria um aumento de 22% durante o ano de 2010, o que significa uma venda de mais de 170 milhões de unidades apenas para mercados como Europa Ocidental, América do Norte, Japão e China. No primeiro



quadrimestre de 2012, 43.131.000 televisores foram mundialmente distribuídos, o que significa uma redução de 3% em relação ao mesmo período de 2011.

Embora haja uma pequena queda nas vendas de televisores, o aumento recorde de vendas de monitores de uma determinada marca em países da Europa demonstra que este mercado continua a crescer independente da atual crise econômica <sup>(8,9)</sup>.

Monitores de LCD são mais leves, mais finos, apresentam maior economia de energia além de não emitirem radiação em relação às telas de tubo de raios catódicos. A partir do desenvolvimento dos transistores de película fina (TFT), houve o surgimento de novos tipos de monitores. O LCD é a principal aplicação desta tecnologia sendo formado a partir de duas peças de vidro polarizado ligado a polímeros preenchido com cristal líquido.

O mecanismo básico de funcionamento é dado a partir do bloqueio da iluminação proveniente da parte de trás da tela. Uma luz de fundo passa pelo primeiro vidro polarizado, ao mesmo tempo, correntes elétricas fazem com que as moléculas de cristal líquido se alinhem para formar as variações de luz que passam para o segundo vidro polarizado e assim ocorre a formação das cores e das imagens. Os monitores de LCD são compostos por uma tela de LCD, partes poliméricas e placas de circuito impresso (PCI) que são componentes de composição muito heterogênea, sendo 70% da sua massa composta de frações não metálicas como epóxi, fibra de vidro e outros materiais e 30% correspondem a metais como cobre, chumbo, ferro, níquel, ouro e prata <sup>(10, 11)</sup>.

Em função dessa heterogeneidade das PCI, a reciclagem é um processo complexo que envolve altos custos e que pode trazer diversos danos ao meio ambiente se não for realizada de forma correta. No entanto, a presença de metais nobres e grandes quantidades de metais preciosos faz com que se torne interessante o estudo de rotas de reciclagem mais baratas e com menos impactos ambientais envolvidos.

Os processos para a recuperação de metais provenientes de PCI são baseados em pirometalurgia, hidrometalurgia, eletrometalurgia e processos mecânicos.

O processo pirometalúrgico associado a resíduos eletroeletrônicos é uma tecnologia usada na recuperação de metais não ferrosos e metais preciosos. O processo típico de pirometalurgia consiste na produção de uma liga de cobre com metais preciosos. Esta técnica pode ser considerada potencialmente adequada para o tratamento de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE), onde os compostos orgânicos podem ser usados como combustível e agente oxidante <sup>(12)</sup>.

O processo hidrometalúrgico ao ser comparado com o processo pirometalúrgico é mais preciso, mais previsível e mais facilmente controlado. O processo consiste em ataques com soluções ácidas e alcalinas com o objetivo de dissolver o material sólido. Os principais passos deste processo consistem de uma série de lixiviações ácidas ou alcalinas do material sólido. As soluções são então submetidas a processos de separação e purificação <sup>(11, 12)</sup>.

Eletrometalurgia é o processo de obtenção de metais através de eletrólise, quando associado à sucata eletrônica está presente na etapa de refino do metal de interesse.

Na reciclagem de sucata eletrônica, o processamento mecânico é usado em uma etapa de pré-processamento do material para posteriormente as demais rotas serem aplicadas apenas nas frações de interesse. Fazendo parte deste processo os estágios de cominuição, classificação e separação por diferença de densidade, peso, granulometria, propriedades magnéticas e elétricas <sup>(11,13)</sup>. Uma vez que as PCI são constituídas de diversos metais é possível fazer uma separação eficiente destes através das suas características físicas, ou seja, a partir de processos mecânicos.

A separação magnética é largamente usada na separação de materiais ferromagnéticos dos materiais não magnéticos. A partir da utilização de um ímã ou eletroímã é possível separar o componente magnético do resto da mistura. A separação eletrostática é baseada na separação de materiais de diferentes condutividades. A separação por diferença de densidade pode ser usada para separar frações metálicas de frações não metálicas como pode ser usada para separar metais com diferentes densidades entre si.

## **2 OBJETIVOS**

Os objetivos a seguir mencionarão as características dos materiais presentes em monitores LCD, bem como a periculosidade, e caracterização química dos materiais presentes nos mesmos; ainda, especificarão o grau de liberação dos materiais presentes nas PCIs, mencionando sobre a realização de ensaios de afunda-flutua e separação gravimétrica;

### **2.1 Objetivo Geral**

Este trabalho tem por objetivo caracterizar os materiais presentes em monitores de LCD quanto a sua periculosidade e composição e estudar a obtenção de frações concentradas em metais a partir das placas de circuito impresso dos respectivos monitores.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Caracterizar a periculosidade das PCI e da tela de LCD a fim de classificar de acordo com a NBR 10004;
- Caracterizar quimicamente os materiais presentes nos monitores de LCD, incluindo as placas de circuito impresso;
- Avaliar o grau de liberação dos materiais presentes nas PCI;
- Realizar ensaios de afunda-flutua com frações cominuídas de PCI;
- Realizar ensaios de separação gravimétrica com as frações cominuídas de PCI a fim de obter frações concentradas nos materiais de interesse.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Os seguintes capítulos apresentarão o desenvolvimento das telas de cristal líquido; bem como a sua estrutura básica de funcionamento; com ênfase nas placas de circuito impresso presente nestas e processos de reciclagem, principalmente reciclagem de materiais metálicos presentes em equipamentos.

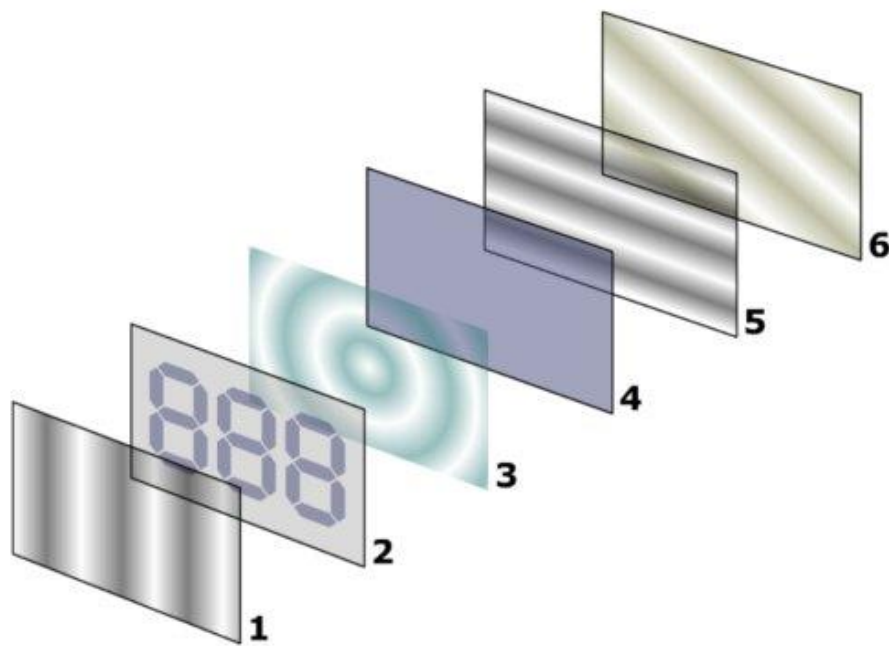
#### **3.1 Telas de LCD**

As telas de cristal líquido têm sido desenvolvidas nas últimas décadas com o objetivo de substituir as telas CRT, principal tecnologia até então. Sua composição é dada a partir da presença de duas placas de vidro preenchidas com cristal líquido, sendo que neste vidro há polarizadores, tendo ainda na tela folhas difusoras, folha reflexiva, lâmpadas fluorescentes como fonte de iluminação e placas de circuito impresso <sup>(14)</sup>.

Segundo Mester, a composição mássica das telas é dada por componentes poliméricos que correspondem a 51% da massa da tela de LCD, os metais 16%, o vidro 22%, placa de circuito impresso 9%, lâmpadas 0,34%, o restante (17%) é principalmente constituído de cabos, borrachas e plásticos laminados <sup>(15)</sup>.

##### **3.1.1 Funcionamento do LCD**

A estrutura básica da tela de LCD pode ser observada na Figura 1. Onde nos itens de 1 a 6 são mostrados os diversos componentes que compõem a tela. O item 1 ilustra o filme polarizador na vertical, o item 2 uma das camadas de vidro com ITO (Indium tin oxide), o item 3 o cristal líquido, o item 4 a camada de vidro com ITO, o item 5 o filme polarizador na horizontal e o item 6 a folha difusora.



**Figura 1: Estrutura da Tela de LCD.** <sup>(16)</sup>

Há dois tipos de sistemas de LCD: de matriz passiva e matriz ativa. No primeiro, usa-se uma grade simples para fornecer a carga para um pixel específico na tela. A matriz passiva é um sistema mais simples, não sendo usado em aparelhos complexos como monitores, tendo aplicação principalmente em equipamentos como visores de calculadoras, forno de micro-ondas, entre outros, uma vez que não exigem variação de cor e não necessitam de contraste e brilho.

Na matriz ativa há a existência de um filme de transistores (conhecido como TFT – Thin Film Transistors) na camada de vidro que permitem que cada pixel seja controlado individualmente <sup>(17)</sup>.

Em uma tela de LCD, na parte posterior está localizada a fonte de iluminação que em monitores/televisores popularmente chamados de LCD são pequenas lâmpadas fluorescentes e nos monitores/televisores de LED (Diodo emissor de luz) há fileiras de LED. Juntamente com esta fonte de luz é colocada uma folha reflexiva, uma placa guia de luz (também conhecida como Perspex) e folhas difusoras que permitem que a luz se espalhe de forma uniforme.

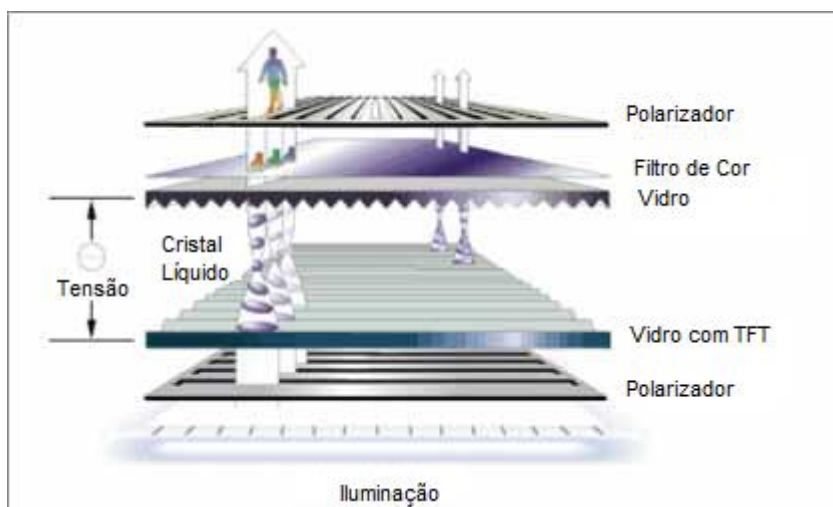
As placas de vidro possuem pequenos sulcos, isolados entre si, cada um com um eletrodo ligado a um transistor. Estes sulcos têm como função alinhar a orientação das moléculas tipo hélice do cristal líquido.

Na tela de vidro há a presença de filmes polarizadores que estão perpendiculares um em relação ao outro, como mostrado na Figura 1. O primeiro filme polarizador que está em contato com as folhas difusoras faz com que a luz emitida no interior da tela seja polarizada e esta luz só será capaz de atravessar o outro filme polarizador com a presença do cristal líquido.

As moléculas de cristal líquido quando alinhadas na forma de uma hélice fazem com que a luz polarizada mude a direção e atravesse o filme polarizador. Sendo esta configuração conhecida como modo “branco”. Quando um campo elétrico é aplicado na tela de vidro, os cristais líquidos se alinham longitudinalmente e a luz que atravessa o primeiro polarizador não muda a direção e desta forma não atravessa o segundo polarizador. Sendo esta configuração conhecida como modo “preto”.

Ao controlar a tensão aplicada entre os eletrodos presentes na camada de ITO, é possível controlar o grau de torção do cristal líquido e, desta forma, a intensidade da luz daquela cor emitida. Na placa de vidro frontal é possível verificar a presença de pixels, formados por três sub-pixels nas cores vermelha, azul e verde. Na placa de vidro posterior há a presença de transístores, TFT.

Cada sub-pixel tem um transistor que o controla. O transistor funciona como um interruptor que permite que a tela seja atualizada linha a linha. Quando uma tensão é aplicada em uma linha específica, cada sub-pixel desta linha pode receber dados de vídeo vindos da parte superior da tela. Apenas uma linha pode receber informações por vez, mas a velocidade com que isto acontece para cada linha é tão rápida, que na tela aparece uma imagem fluída. Na Figura 2 é possível observar como a luz atravessa a tela de LCD, formando a imagem.



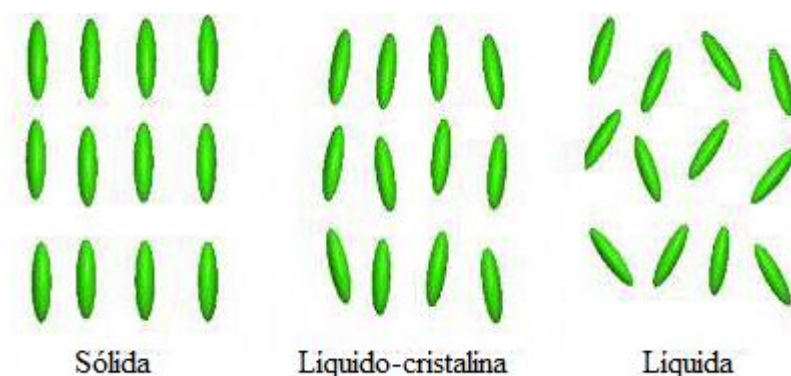
**Figura 2: Formação da Imagem em uma Tela de LCD. Adaptado de plasma.com. <sup>(18)</sup>**

### 3.1.2 Cristal Líquido

O cristal líquido é uma combinação das propriedades de escoamento dos líquidos e de ótica dos cristais <sup>(19)</sup>. São moléculas que se encontram num estado intermediário entre sólido e líquido, ou seja, mesomórfico. Este estado físico intermediário é considerado como um quarto estado da matéria, além dos três já conhecidos: sólido, líquido e gasoso <sup>(20)</sup>.

O cristal líquido foi observado pela primeira vez em 1888 e desde então diversos estudos foram realizados e materiais foram desenvolvidos. Atualmente quase todas as telas de cristal líquido utilizam uma mistura de cristal líquido nemático, uma das suas características é que esta mistura é afetada por correntes elétricas <sup>(21)</sup>.

Sólidos cristalinos têm seus átomos organizados em uma rede espacial, nos líquidos as moléculas estão organizadas de forma aleatória no espaço. O cristal líquido embora o aspecto seja de um líquido, pode-se observar certo grau de orientação em um microscópio, porém não se mantém a longo alcance <sup>(22)</sup>. Na Figura 3 observa-se uma ilustração de ordem molecular das fases sólida, líquido-cristalina e líquida.



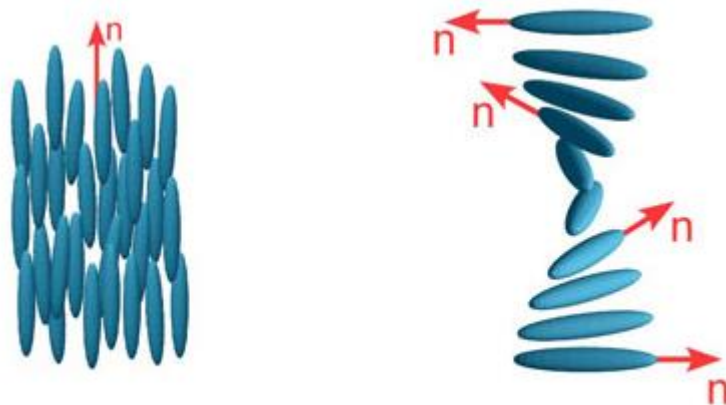
**Figura 3: Representação das Fases Sólida, Líquido-Cristalina e Líquida.**<sup>(23)</sup>

As moléculas que apresentam mesofases líquido-cristalinas podem ser divididas em duas categorias de acordo com os parâmetros mais relevantes nas transições de fases: os termotrópicos e os liotrópicos <sup>(24)</sup>. Os parâmetros considerados relevantes são: pressão, concentração e temperatura. Em cristais líquidos liotrópicos, o parâmetro é a concentração e nos cristais líquidos termotrópicos, o parâmetro é a temperatura. Sendo o último o mais usado <sup>(25)</sup>. Existem nos cristais líquidos termotrópicos, três mesofases usadas em telas de LCD: nemática, a esmética e colestérica.

A fase mais simples e menos ordenada dos cristais líquidos é a fase nemática, onde as moléculas apontam em média em uma determinada direção chamada de vetor  $n$ , conforme o observado na Figura 4. Este cristal líquido tende a ser menos viscoso e a apresentar uma aparência turva quando comparado ao esmético <sup>(26,27,28)</sup>.

A segunda fase é a esmética, as moléculas nesta fase mostram um grau de ordem translacional. No entanto, apesar das camadas possuírem uma grande regularidade entre si, não há uma regularidade no posicionamento das moléculas em cada camada. Este tipo de cristal líquido é o mais parecido com o sólido, de aspecto turvo e viscoso.

Na fase colestérica, as moléculas não possuem um vetor  $n$  uniforme, conforme a Figura 4. É uma fase composta de moléculas nemáticas mesônicas contendo um centro quiral que produz forças intermoleculares que favorecem o alinhamento entre as moléculas com uma pequena variação de ângulo.



**Figura 4: Mesofase Nemática e Mesofase Colestérica.** <sup>(26)</sup>

Em uma tela de LCD há em torno de  $0,6\text{mg/cm}^2$  de cristal líquido, em uma tela de 15 polegadas há 400mg de cristal líquido, sendo esta uma mistura que contém entre 10 e 25 componentes. A produção mundial em 2005 foi de 70 toneladas de cristal líquido <sup>(15)</sup>.

No LCD, o cristal líquido está presente entre duas camadas de vidro laminado e para que ocorra a formação da imagem, é necessário que haja um material condutor elétrico transparente que conduza eletricidade para o cristal líquido e desta forma o feixe de luz seja direcionado. O material que apresenta essas características é o óxido de índio dopado com óxido de estanho (ITO), uma mistura de  $\text{In}_2\text{O}_3$  e  $\text{SnO}_2$ , sendo que o óxido de estanho corresponde entre 10% e 17% em peso <sup>(29)</sup>.



A camada de ITO combina as características de um sólido com boa condutividade elétrica, resistência à radiação ultravioleta, com capacidade de refletir a radiação infravermelha e transparente levemente amarelado, de acordo com a concentração de óxido de estanho, apresentando uma transparência de aproximadamente 90% <sup>(30)</sup>.

### **3.1.3 Vidro**

Há indícios de que o vidro tenha surgido no Egito para ser utilizado como adorno e utensílio. No entanto, foi a partir do século XX com o uso do vidro soda-cal que se iniciou a fabricação de janelas, garrafas, lâmpadas e com o vidro borossilicato a fabricação de material de laboratório <sup>(31)</sup>.

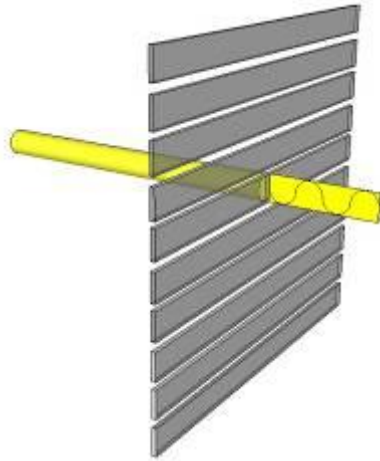
O vidro soda-cal é também utilizado para a fabricação de vidro laminado desde 1959, sendo este o vidro usado nas telas de cristal líquido que são formadas por duas camadas de vidro com espessura de 0,7mm cada <sup>(32)</sup>.

O vidro laminado tem densidade de 2,44 g/cm<sup>3</sup>, temperaturas de fusão e transição vítrea de 1000°C e de 730°C respectivamente, dureza na escala de Mohs de 6 a 7 e resistência química a hidrocarbonetos e solventes <sup>(33)</sup>.

Os vidros são colocados em camadas e, entre estas, usa-se um filme polimérico com características adesivas e alta resistência com o objetivo de aumentar a resistência mecânica do vidro. Os materiais usados neste filme polimérico são: triacetato de celulose e poli (álcool vinílico) <sup>(30, 34)</sup>.

### **3.1.4 Polarizador**

As ondas de luz de fonte artificial, como uma lâmpada, irradiam e vibram em todas as direções e o polarizador é um filtro que permite a passagem de luz em uma direção específica, conforme o observado na Figura 5. A luz polarizada paralela a sequência é absorvida pelo filtro, a luz polarizada perpendicular à sequência é transmitida.



**Figura 5: Passagem de Luz em um Filtro Polarizador.**

Na tela de LCD há dois polarizadores, um em cada camada de vidro, posicionados em ângulos de  $90^\circ$ ; ou seja, um polarizador com linhas horizontais como na Figura 5 e outro com linhas verticais.

Os polarizadores devem ter algumas características específicas como: ser compostos por polímeros, ter alta resistência mecânica e flexibilidade, permanecerem transparentes e não ter suas características alteradas com a luz solar. Os polímeros que atendem a estas especificações são o triacetato de celulose e o poli (álcool) vinil.

O triacetato de celulose tem como característica a transparência, flexibilidade e resistência mecânica. O poli (álcool) vinil dopado com iodo age como um filtro de luz para evitar a degradação das moléculas de cristal líquido, ou seja, evita a passagem de raios ultravioleta para a tela <sup>(30)</sup>.

### **3.2 Placas de Circuito Impresso**

As PCI correspondem aproximadamente 30% em massa da sucata eletrônica gerada, o que é justificado pela presença destas nos mais variados equipamentos eletrônicos. São constituídas de um substrato não condutor, onde componentes eletrônicos de materiais condutores ou semicondutores são montados <sup>(35)</sup>. Estes componentes eletrônicos são resistores, capacitores, relés e circuitos integrados <sup>(36)</sup>.

Materiais condutores como cobre e alumínio ligam os componentes nos circuitos, os materiais não condutores podem ser polímeros como acrilonitrila butadieno estireno (ABS), resina epóxi e cerâmicos. A forma como os componentes são montados e composição varia de acordo com a aplicação da PCI <sup>(35)</sup>.

Diversos autores caracterizaram diferentes placas de circuito impresso. Como pode ser observado na Tabela 1, estas placas possuem variadas quantidades de metais o que dificulta afirmar a constituição exata de uma PCI.

**Tabela 1: Composição de Placas de Circuito Impresso segundo diversos autores.**

%	Cu	Al	Pb	Zn	Ni	Fe	Sn	Au*	Ag*	Pd*
<b>A</b>	16	5	2	1	1	5	3	0,025	0,1	0,01
<b>B</b>	25,06	-	-	0,04	0,00024	0,66	0,8	-	-	-
<b>C</b>	26,8	4,7	1	1,5	0,47	5,3	-	80	3300	-
<b>D</b>	16	-	-	-	2	3	-	0,03	0,05	0,01
<b>E</b>	20	-	4	1	2	8	2	0,1	0,5	0,005
<b>F</b>	20	2	2	1	2	8	4	1000	2000	50
<b>G</b>	26,8	4,7	-	1,5	0,47	5,3	1	80	3300	-
<b>H</b>	10	7	1,2	1,6	0,85	-	-	280	110	-
<b>I</b>	15,6	-	1,35	0,16	0,28	1,4	3,24	420	1240	10
<b>J</b>	22	-	1,55	-	0,32	3,6	2,6	350	-	-
<b>K</b>	17,85	4,78	4,19	2,17	1,63	2	5,28	350	1300	250

A = Young Jun Park <sup>(37)</sup>; B = Yang et al. <sup>(38)</sup>; C = Guo et al. <sup>(39)</sup>; D = Goosey and Kellner <sup>(40)</sup>; E = Sum <sup>(41)</sup>;

F = Shuey et al. <sup>(42)</sup>; G = Zhao et al. <sup>(43)</sup>; H = Zhang and Forsberg <sup>(44)</sup>; I = Kim et al. <sup>(45)</sup>; J = Iji and Yokoyama <sup>(46)</sup>

e K = Kogan <sup>(47)</sup>

\* = ppm

A partir da Tabela 1 observa-se a presença de diversos metais nas PCI, há ainda metais em menor quantidade não citados como: o tântalo presente nos capacitores, o gálio, índio, titânio, germânio, arsênio, selênio e telúrio que podem ser encontrados em chip e em outros componentes <sup>(48)</sup>.

Essa diversidade de materiais faz com que a reciclagem das PCI torne-se um processo complexo que envolve alto custo, podendo causar um grande dano ao meio ambiente e à saúde da população se não realizada corretamente. Dentre os principais componentes tóxicos presentes nas placas de circuito impresso estão: o chumbo, éteres difenil polibromados (PBDE), bifenilos polibromados (PBB), dioxinas policloradas e furanos <sup>(49)</sup>. Estas substâncias poluem o ar, o solo e a água.

Segundo Sepúlveda et al. <sup>(49)</sup> em regiões de países como a China e a Índia, onde a reciclagem de sucata eletrônica é realizada em grande parte sem qualquer tipo de prevenção às contaminações ao meio ambiente e à população em geral; as concentrações destes poluentes de PCI, estão em níveis muito acima do aceitável. E a principal causa para isso são

as técnicas empregadas para obtenção dos metais presentes nas placas, como a queima a céu aberto e lixiviações ácidas sem controles ambientais descritas por Jiuyong Guo e Jim Puckett<sup>(50)</sup>.

A não reciclagem ou o uso de técnicas inadequadas, não só gera poluentes no fim de vida da sucata eletrônica como um todo, mas também faz com que metais deixem de ser aproveitados para a fabricação de novos componentes. Os metais presentes nas placas de circuito impresso, tais como: cobre, níquel, ouro, prata e platina são obtidos primariamente a partir de minérios com teores muito baixos; ou seja, a obtenção de metais a partir da mineração está associada a impactos ambientais significativos e altos custos de produção.

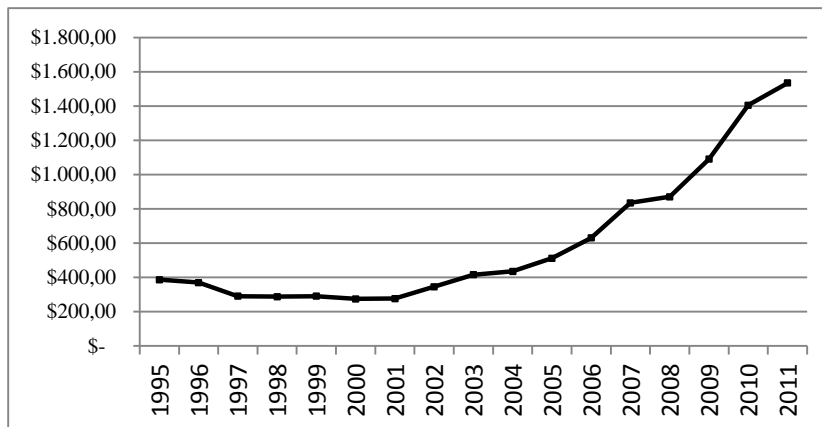
A produção secundária de metais tem custos econômicos e impactos ambientais muito menores do que a produção primária, como pode ser observado quando comparamos o *material intensity* (MIT) de alguns metais. De acordo com Saurat & Bringezu<sup>(51)</sup> o paládio primário tem um MIT de 99.891 kg, o que significa que 99,891 toneladas de materiais são necessárias para produzir um grama de paládio, enquanto o MIT de produção secundária é de 2,394. O cobre primário tem um MIT igual a 348,47 kg e o cobre secundário tem um MIT de 2,38kg<sup>(52)</sup>, assim como o MIT primário do alumínio é 37kg e o secundário é de 0,85kg. O ouro tem um MIT primário de 540.000, sendo que uma mina de ouro é economicamente viável quando possui 0,5 ppm<sup>(53)</sup> e as PCI podem ter até 1000 ppm conforme mostrado na Tabela 1.

Em 2006, 12% da produção primária de ouro, 30% da produção primária de prata e 15% da produção primária de paládio foram usadas na fabricação de equipamentos eletroeletrônicos (EEE)<sup>(54)</sup>.

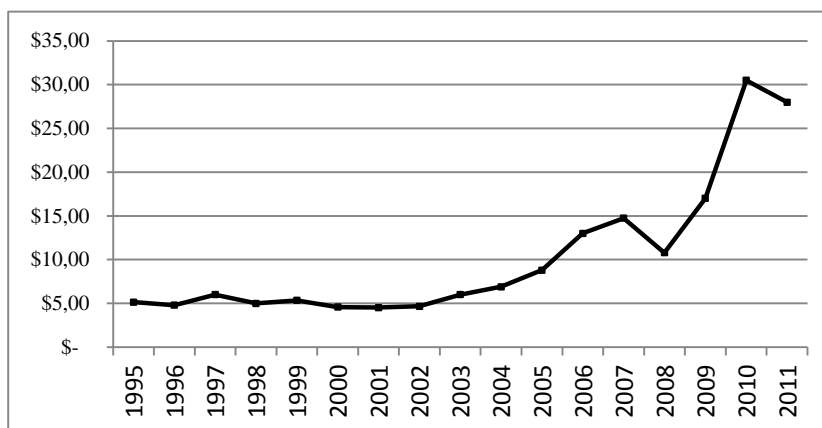
Placas de circuito impresso possuem metais de alto valor agregado e que demandam de muitos recursos para obtê-los a partir de processos primários o que justifica a reciclagem destes materiais. A correta disposição / tratamento deste material evita não só a contaminação do meio ambiente, como também evita o consumo de recursos naturais e consequentemente age como um estabilizador de preço destes produtos.

A produção de equipamentos eletrônicos cresce a cada ano, ao passo que a reciclagem destes equipamentos não acompanha esse crescimento; logo, o uso de matérias-primas primárias aumenta, aumentando também o valor dos metais, como observado na Figura 6 e na Figura 7, onde são mostrados os históricos de valores do ouro e da prata por 28,35 gramas (1 onça). Com o aumento do valor da matéria-prima, ocorre também o aumento do valor do produto final e de acordo com Park<sup>(37)</sup>, os metais preciosos presentes nas placas

de circuito impresso correspondem por mais de 80% do valor total intrínseco apesar da quantidade ser inferior a 1% em peso.



**Figura 6: Histórico de Preço para 28,35g (1 onça) de Ouro nos Meses de Dezembro.**<sup>(55)</sup>



**Figura 7: Histórico de Preço para 28,35g (1 onça) de Prata nos Meses de Dezembro.**<sup>(55)</sup>

### 3.3 Legislação

As principais leis e normas relacionadas aos resíduos eletrônicos são:

- Convenção de Basileia;
- Diretiva WEEE;
- Diretiva RoHS;
- PNRS.

A convenção de Basileia em vigor desde 05 de maio de 1992 trata do controle transfronteiriço de resíduos perigosos e seu depósito. A convenção prevê que os resíduos gerados em um determinado país devem ser eliminados no mesmo. Uma vez que os resíduos

de sucata eletrônica são considerados perigosos, a exportação destes é permitida somente em condições especiais <sup>(56)</sup>.

A Diretiva WEEE e a Diretiva RoHS foram criadas pela União Europeia a fim de reduzir o impacto ambiental gerado pela sucata eletrônica e são aplicadas em 25 países membros. Segundo a Diretiva WEEE, o fabricante é o responsável pelo recolhimento, reciclagem e/ou eliminação dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos. A Diretiva RoHS trata da restrição do uso de determinadas substâncias consideradas perigosas durante o processo de fabricação dos produtos. As substâncias restritas são: cádmio, chumbo, cromo hexavalente, mercúrio, bifenilos polibromados e éteres difenil polibromados <sup>(57)</sup>.

A política nacional de resíduos sólidos, PNRS, sancionada em 2010, é a primeira legislação brasileira com abrangência nacional que inclui os resíduos eletroeletrônicos. Esta lei responsabiliza os fabricantes, importadores, comerciantes e distribuidores de produtos eletrônicos e seus componentes pela destinação final destes equipamentos <sup>(3)</sup>, incluindo a reciclagem dos materiais. Alguns estados brasileiros já possuíam leis, decretos ou regulamentos relacionados com os eletroeletrônicos, porém com um impacto muito pequeno na gestão deste tipo de resíduo.

Porém antes que a PNRS possa ser aplicada na sua totalidade alguns entraves precisam ser superados, entre eles a política fiscal para o transporte de REEE, definição da periculosidade dos REEE, tecnologias de reciclagem, empresas de reciclagem com capacidade técnica e legal para execução da atividade, entre outros <sup>(58)</sup>.

Com relação a existência de empresas recicladores de REEE, segundo a ABINEE <sup>(58)</sup>, no Brasil não foram identificadas empresas com tecnologia para a reciclagem de PCI, monitores e televisores CRT, entre outros. A maioria das empresas existentes apenas separa os materiais de maior valor agregado e revende para o exterior, enquanto que os materiais de menor valor agregado como plásticos e vidros são revendidos internamente para o mercado brasileiro.

### **3.4 Caracterização de Resíduos Sólidos**

Anterior aos processos de reciclagem e descarte de sucatas, é necessário fazer a caracterização deste material através das suas propriedades físico-químicas, bem como a avaliação da periculosidade. No Brasil, o procedimento para a avaliação de periculosidade é descrito nas Normas NBR 10004, 10005 e 10006 <sup>(59, 60, 61)</sup>.

A periculosidade de um resíduo é caracterizada em função de propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas que podem oferecer riscos à saúde pública ou riscos ao meio ambiente, quando o resíduo é manuseado ou a destinação é realizada de forma incorreta.

Podem ainda apresentar características como ser inflamável, corrosivo, reativo, patogênico ou tóxico. A toxicidade é definida conforme os ensaios descritos nas Normas NBR 10005 e 10006 de Lixiviação de Resíduos e de Solubilização de Resíduos respectivamente. Nestes ensaios é obtida a concentração dos contaminantes presentes no lixiviado.

Os resíduos são classificados em três classes: Classe I – Perigosos; Classe II – Não Perigosos (A – Não Inertes e B – Inertes).

- Classe I – São resíduos sólidos ou misturas de resíduos que apresentam risco à saúde pública e/ou efeito adverso em pessoas, animais, plantas e ao meio ambiente. Se os resíduos submetidos ao ensaio de lixiviação descrito na NBR 10005 apresentarem concentrações de contaminantes superior aos limites apresentados no Anexo F da NBR 10004, são classificados como classe I – Perigosos.
- Classe II A – Não Inertes – São resíduos que não se enquadram na Classe I, mas também não são inertes. Os resíduos classe II A podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
- Classe II B – Inertes – São resíduos que quando submetidos ao ensaio de solubilização descrito na NBR 10006 não têm nenhum dos componentes solubilizados em concentração superior aos limites apresentados no Anexo G da NBR 10004.

Os limites máximos de concentração de alguns elementos e íons constantes nos Anexos F (através do ensaio de lixiviação – NBR 10005) e G (através do ensaio de solubilização – NBR 10006) da NBR 10004 podem ser observados na Tabela 2. Os elementos apresentados são aqueles que podem ser encontrados mais comumente em PCI e nas telas de vidro do LCD.

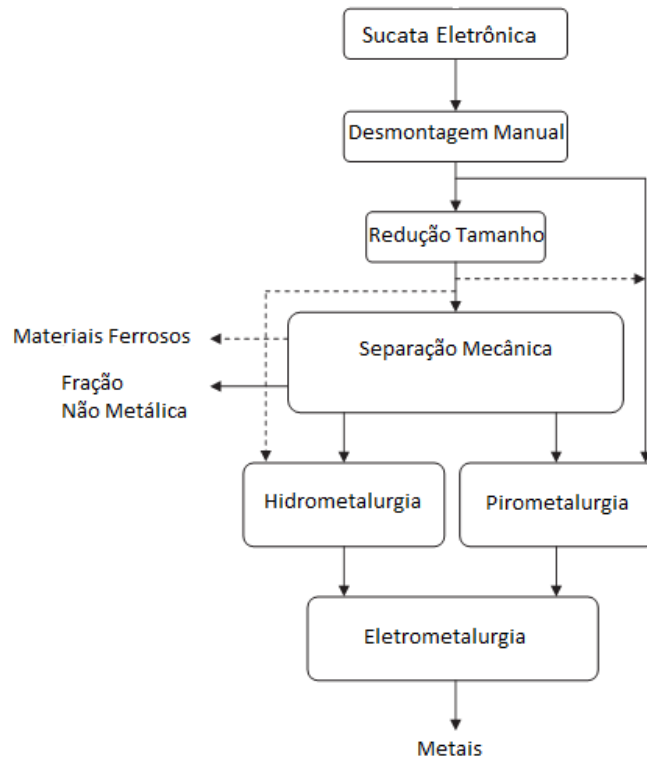
**Tabela 2: Concentrações Máximas Apresentadas nos Anexos F e G da NBR 10004 <sup>(59)</sup>.**

Elemento / Íon	Concentração Máxima (mg/L) Anexo F.	Concentração Máxima (mg/L) Anexo G.
Alumínio	-	0,2
Cádmio	0,5	0,005
Chumbo	1,0	0,01
Cobre	-	2,0
Cromo Total	5,0	0,05
Ferro	-	0,3
Fluoreto	150	1,5
Mercúrio	0,1	0,001
Prata	5,0	0,05
Sódio	-	200,0
Zinco	-	5,0

### **3.5 Processos de Reciclagem**

Realizar a reciclagem de resíduos eletroeletrônicos é um processo bastante complexo, seja pela sua composição heterogênea, seja pela presença de materiais extremamente tóxicos como: chumbo e retardantes de chama polibromados. O fluxograma mostrado na Figura 8 ilustra os principais processos disponíveis para a reciclagem de materiais de sucata eletrônica, bem como as etapas em que estes são utilizados. Os próximos capítulos irão descrever de forma mais detalhada os processos à base de Pirometalurgia, Hidrometalurgia, Eletrometalurgia e Processos Mecânicos.





**Figura 8: Fluxograma Esquemático dos Processos Possíveis para a Recuperação de Materiais.**

**Adaptado de Tuncuk et al. <sup>(62)</sup>**

### 3.5.1 Pirometalurgia

A pirometalurgia é utilizada na obtenção de metais não ferrosos bem como os metais preciosos provenientes da sucata eletrônica. Neste processo, há diversos métodos entre eles: a incineração, fundição, sinterização, fusão e reações de fase gasosa a elevadas temperaturas. A sucata moída é queimada em um forno para a remoção dos polímeros e os óxidos refratários formam uma fase de escoria junto com alguns óxidos metálicos <sup>(62)</sup>.

Grande parte da sucata eletrônica gerada no mundo é processada por pirometalurgia como agregado para a fundição de cobre. Os polímeros presentes representam um problema por causa da grande quantidade e potencial geração de substâncias voláteis perigosas <sup>(63)</sup>.

De acordo com Sun <sup>(41)</sup> a pirometalurgia tem diversas desvantagens a longo prazo tais como: poluição do ar, a perda de metais nobres e a dificuldade de recuperação de metais como alumínio, estanho, zinco e chumbo.

Segundo Hagelüken <sup>(64)</sup> a pirometalurgia pode de certa forma, ser apropriada para o tratamento de resíduos eletroeletrônicos em que os constituintes podem substituir o coque

como combustível e agente redutor. No entanto, é um processo que tem como pré-requisito uma matéria-prima rica em cobre e metais preciosos, necessitando de muita energia além de ter altos custos. Retardantes de chama halogenados usados na PCI conduzem à formação de dioxinas e furanos, além dos metais voláteis e poeira que podem tornar-se um problema ambiental e, desta forma é necessário tratar os gases depreendidos no processo.

No processo pirometalúrgico, a sucata eletrônica normalmente passa por um pré-tratamento (desmontagem, moagem e processamento físico) e então é fundida onde se obtêm barras de cobre, que são submetidas a um refino eletrolítico para obtenção de cobre de alta pureza. A lama remanescente do processo de eletrorefino do cobre é refinada para recuperar metais preciosos presentes <sup>(62)</sup>.

No processo pirometalúrgico de combustão, tanto polímeros quanto materiais orgânicos são removidos com o objetivo de concentrar metais. As PCI moídas são queimadas em um forno e um resíduo sólido concentrado em metais é gerado. Materiais poliméricos são queimados gerando compostos voláteis e uma lama com óxidos refratários. Neste processo apenas ligas são obtidas. De acordo com Havlik <sup>(65)</sup> a temperatura é um parâmetro importante na combustão. Sendo este um processo que ocorre na presença de oxigênio, principalmente do ar. A temperatura deve ser superior a 1200°C.

A pirólise é um processo onde a temperatura é moderada e não há presença de oxigênio. A matéria orgânica é decomposta a gases e líquidos, que podem ser usados como combustíveis. Já os materiais inorgânicos permanecem praticamente inalterados durante o processo, podendo ser recuperados e reutilizados.

De acordo com De Marco <sup>(66)</sup> este é um processo apropriado para resíduos complexos, que contem diferentes polímeros misturados com outros materiais, como é o caso das placas de circuito impresso.

No processo de pirólise, são obtidos três produtos: os líquidos, os gasosos e resíduos sólidos. Para Quan <sup>(67)</sup> o desafio está em utilizar de forma adequada estes produtos, uma vez que o esgotamento do petróleo e questões ambientais tem atraído grande interesse na pesquisa por combustíveis alternativos. Um dos métodos para obter combustíveis alternativos é a conversão de substâncias residuais em energia.

Na pirólise de placas de circuito impresso, os gases gerados consistem principalmente de CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, alcanos e alcenos que podem ser usados como gás combustível ou ainda usados em processos de síntese química. O óleo resultante do processo

pode ser usado como óleo combustível ou ainda como insumo químico, desde que contenham uma grande proporção de fenol e derivados.

Tohka and Lehto <sup>(68)</sup> realizaram um estudo onde a sucata eletrônica recebia tratamento mecânico e posteriormente tratamento térmico. Para o estudo, optou-se por utilizar processos de alta temperatura; enquanto que a formação de gases de combustão voláteis e a recuperação de compostos utilizáveis como produtos de fusão foram discutidas. Para os autores, o processo de pirólise deveria preceder a combustão e a fusão, uma vez que os compostos voláteis perigosos seriam removidos do sistema.

### 3.5.2 Hidrometalurgia

O processo hidrometalúrgico ao ser comparado com o processo pirometalúrgico é mais exato, mais previsível e mais facilmente controlado <sup>(12)</sup>. Os principais passos deste processo consistem de uma série de lixiviações ácidas ou alcalinas do material sólido, como por exemplo, lixiviação com cianeto, com halogênios, com tiouréia ou com tiosulfato. As soluções são então submetidas a processos de separação e purificação que podem ser por precipitação de impurezas, extração por solvente ou adsorção.

Uma vez que os materiais metálicos presentes em placas de circuito impresso são geralmente recobertos ou encapsulados por materiais poliméricos ou cerâmicos, um processo mecânico de pré-tratamento é necessário para expor os metais de interesse à ação do agente lixiviante e, portanto, facilitar extração <sup>(62)</sup>.

De acordo com Zhou <sup>(69)</sup> a recuperação de diversos metais por hidrometalurgia é um processo longo, complicado e que envolve altos custos. Portanto, as tecnologias tradicionais não podem atender às necessidades futuras da indústria por causa da contaminação ambiental, alto custo e baixa eficiência.

Entre as principais desvantagens do processo hidrometalúrgico está à necessidade de usar diferentes lixiviantes de acordo com o metal de interesse e a inevitável geração de efluentes.

Segundo Cui <sup>(12)</sup> o cianeto tem sido usado nas indústrias de mineração a mais de um século e o mecanismo de dissolução do ouro é um processo eletroquímico. O pH é um parâmetro importante a ser considerado na dissolução de metais nobre como ouro, prata, paládio e platina utilizando solução de cianeto. Estudos realizados por Dorin and Woods <sup>(70)</sup> mostram que a melhor eficiência para esta solução é obtida com pH entre 10 e 10,5. A Tabela 3 mostra as constantes de estabilidade de cianocomplexos metálicos. Os complexos que

apresentam constantes de equilíbrio superiores àquela do cianocomplexo de ouro são formados preferencialmente durante a cianetação <sup>(71)</sup>.

**Tabela 3: Constantes de Estabilidade de Cianocomplexos <sup>(71)</sup>**

Íon	Log β <sub>1</sub>
Zn <sup>2+</sup>	19,6
Ag <sup>+</sup>	20,5
Cu <sup>+</sup>	21,6
Ni <sup>2+</sup>	30,2
Fe <sup>2+</sup>	35,4
Au <sup>+</sup>	39,3
Fe <sup>3+</sup>	43,6
Co <sup>3+</sup>	64,0

<sup>1</sup>β representa a constante de equilíbrio para a seguinte reação de complexação do metal:  $M^{n+} + mCN^- = M(CN)_m^{n-m}$

A partir da Tabela 3, observa-se que a lixiviação de ouro com cianeto é extremamente favorável uma vez que, dos metais estudados, apenas o ferro (III) e o cobalto podem ser vistos como interferentes. No entanto, o cianeto é um composto químico extremamente tóxico ao meio ambiente e à vida humana. Desta forma, diversos lixiviantes substitutos vem sendo estudados.

Haletos vêm sendo usados, antes mesmo do cianeto. Com exceção do flúor e do astato, todos os halogênios têm sido testados e/ou usados para a extração de ouro <sup>(12)</sup>. Tanto ouro (I), quanto ouro (III) complexam com cloro, bromo e iodo, dependendo das condições da solução. Entretanto, apenas o cloro tem sido aplicado em escala industrial <sup>(72)</sup>. Diversos estudos têm sido realizados para determinar a eficácia do cloro <sup>(73,74,75, 76, 77)</sup>. No entanto, o uso do cloro como agente lixiviante é mais difícil de ser aplicado do que cianeto, por dois motivos principais:

- uso de equipamentos especiais de aço inoxidável e borracha são necessários para resistir a ácidos altamente corrosivos e condições de oxidação;
- cloro gasoso é altamente tóxico e deve ser controlado para evitar qualquer risco para a saúde.

Segundo publicação do CETEM <sup>(78)</sup> a tiouréia também é um lixiviante alternativo para obtenção de ouro e prata, sendo menos tóxica que o cianeto e apresenta altas taxas de dissolução. No entanto, ainda é um processo considerado caro e necessita de maiores estudos.

Outra alternativa que tem sido estudada como o substituto ao cianeto e largamente utilizado na indústria fotográfica e farmacêutica é o tiosulfato. Acredita-se que a dissolução de ouro em tiosulfato amoniacal é uma reação eletroquímica catalisada pela presença de íons de cobre. A vantagem deste método está na estabilidade do complexo formado por ouro e tiosulfato; sendo necessário manter um pH alcalino de forma a evitar a decomposição do tiosulfato em meio ácido <sup>(12)</sup>. A principal desvantagem do método é o alto consumo do reagente durante a extração.

### 3.5.3 Eletrometalurgia

Na reciclagem de sucata eletrônica os processos eletroquímicos são geralmente usados nas etapas de refino tendo como objetivo a recuperação do metal puro.

A eletrometalurgia engloba estudos dos aspectos técnicos da redução eletroquímica de metais. Este processo pode ser dividido em dois grupos principais:

- Eletro-obtenção;
- Eletrorefino;

A eletro-obtenção é a extração de metais a partir de uma solução aquosa ou de sais fundidos. Em grande escala, a eletro-obtenção em sais fundidos é usada para a extração de elementos eletronegativos que não podem ser depositados de soluções aquosas, tais como: alumínio, magnésio, bem como cobre, zinco e cádmio muito puros <sup>(79)</sup>.

O eletrorefino é a purificação de metais por eletrólise. O metal impuro é dissolvido anodicamente e o metal puro é depositado catodicamente, enquanto as impurezas ficam na lama anódica ou como íons na solução. Diversos metais passam pelo processo de eletrorefino entre eles o cobre em função das suas propriedades condutoras e metais preciosos por causa do custo <sup>(79)</sup>. O processo de eletrorefino do ouro começou a ser desenvolvido em 1874, por Emil Wohlwill. O objetivo inicial era estabelecer um método eletrolítico para separar a platina do ouro. No entanto, verificou-se que a principal característica deste processo consistia na dissolução eletroquímica dos constituintes do material rico em ouro, funcionando como ânodo, e a deposição de ouro quimicamente puro no cátodo, ou seja, a principal aplicação deste processo está na obtenção de ouro de elevada pureza a partir de um material impuro <sup>(80)</sup>.

Com relação à recuperação/reciclagem, diversos estudos têm sido realizados usando técnicas eletroquímicas com o objetivo de obter metais provenientes de sucata. Ubaldini <sup>(81)</sup> estudou a recuperação de metais de resíduos da indústria galvânica e de eletrônicos. A caracterização realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de raio-X e análise química mostrou grande quantidade de cobre, níquel, manganês, chumbo, estanho e tungstênio. Um processo de lixiviação combinado com eletro-obtenção foi proposto com o objetivo de diminuir o volume de rejeitos e propiciar a recuperação seletiva de Cu e Ni. Do conteúdo inicial, foi recuperado no cátodo em torno de 94-99% de Cu e Ni.

Scott <sup>(82)</sup> estudou a reciclagem de Cu, Pb e Sn presentes em soluções usadas na produção de PCI. Foram usados neste estudo dois processos: a reciclagem eletroquímica dos metais e a combinação de deposição eletroquímica de cobre com a precipitação de estanho e chumbo. Segundo Sum <sup>(41)</sup> se os metais forem concentrados através de processos hidrometalúrgicos, eles podem ser eletro-obtidos a partir das soluções aquosas sobre o cátodo. Sum ainda cita as principais vantagens do processo eletrometalúrgico na recuperação de metais preciosos:

- Poucas etapas;
- É possível recuperar a partir da eletrólise entre 95 – 97% da fração de metais preciosos encontrados na sucata;
- A quantidade de metais preciosos presentes no lodo anódico após as etapas de fundição e de eletrólise é muito baixo;
- É aplicável à sucata que tenham uma camada superficial de metais preciosos sobre um substrato de metal base;
- Pode-se realizar a dissolução dos metais simultaneamente ou seletivamente, que o substrato, a base de cobre, permanece inalterado;
- O eletrólito pode ser reciclado.

Veit <sup>(83)</sup> ainda cita como vantagem do processo de eletro-obtenção a redução de custo no consumo de produtos químicos e, como desvantagem cita a baixa eficiência para tratar soluções com baixa concentração de metais, além da geração de gases que são desprezados do ânodo.

### **3.5.4 Processos Mecânicos**

Uma vez que o processamento mecânico é um dos principais temas deste trabalho, será dada uma abordagem mais detalhada sobre o assunto, descrevendo as diversas técnicas empregadas na área.

## **3.6 Processos Mecânicos**

Processos mecânicos vêm sendo utilizados em etapas de tratamento e beneficiamento de minérios na metalurgia primária. Na reciclagem de sucatas, o processamento mecânico é visto como um pré-tratamento que associa diferentes estágios de separação de compostos e componentes do resíduo <sup>(11)</sup>. Dentro do processamento mecânico estão diversas etapas: cominuição, classificação e separação <sup>(84)</sup>, sendo as principais a separação gravimétrica, magnética e a base de propriedades elétricas. Atualmente, diversos estudos de processamento mecânico vêm sendo realizados com materiais heterogêneos, como a sucata eletrônica.

Usualmente, para permitir a recuperação dos materiais de REEE, os materiais precisam, inicialmente, serem “liberados” por processamento mecânico e então as frações de interesse podem ser separadas. Moinhos são os equipamentos mais comumente usados para reduzir o REEE a frações menores, e assim, liberar as fases. Após, os métodos tipicamente usados para separar esses materiais incluem classificação manual, separação por densidade, separação magnética e separação eletrostática. No entanto, de acordo com alguns autores, estas técnicas são limitadas devido a perda de materiais, diminuindo a eficiência <sup>(69, 85)</sup>.

### **3.6.1 Cominuição**

A cominuição tem por finalidade a redução do tamanho de um sólido. Os mecanismos a serem usados podem ser pressão, impacto, abrasão ou corte. Há dois tipos de moinhos que podem ser usados no processo: o moinho vertical onde o sólido entra pelo topo do equipamento e é quebrado quando passa pelas facas ou martelos em movimento. O tamanho da partícula na saída é definido pelo ajuste da distância entre os martelos ou facas e as paredes. No moinho horizontal, o tamanho da partícula na saída é definido por uma grade, que pode ser trocada de acordo com o tamanho desejado <sup>(84)</sup>.

A cominuição ou fragmentação é amplamente usada na lavra. O princípio desta operação pode ser explicado a partir da estrutura cristalina dos minerais. A configuração dos

átomos é determinada pelo tamanho e tipos de ligações físicas e químicas. Estas ligações interatômicas são eficientes à pequenas distâncias, mas podem ser rompidas se tensionadas por forças externas. Um material se rompe quando o limite de ruptura é ultrapassado, ou seja, quando todas as ligações de um determinado plano se rompem <sup>(86)</sup>.

Na sucata eletrônica, a fragmentação é realizada para redução do tamanho do material e também liberação de materiais que não ficam expostos quando o equipamento está inteiro. Os principais equipamentos utilizados para a etapa de cominuição são <sup>(11)</sup>:

- Shredder: moinho de corte;
- Moinho de corte: moinho de facas;
- Fragilização criogênica.

O material reduzido passa então pela etapa de classificação.

### **3.6.2 Classificação**

Após passar pela cominuição, o material é geralmente classificado de acordo com tamanho de partícula. Essa classificação é realizada com peneiras que possuem superfícies perfuradas. Estas perfurações são medidas em *mesh*; onde quanto maior o *mesh* menor é a abertura da malha, ou seja, menor terá que ser a partícula para passar pela peneira.

Uma vez que esse processo não considera outras propriedades além do tamanho do material, as peneiras podem ser usadas na etapa de classificação do material antes do processo de separação. A classificação pode ser usada para dois objetivos: estudar o grau de liberação dos materiais presentes, ou seja, até que nível o material deve ser cominuído e também para estudar a tendência de determinado material de se concentrar em uma determinada faixa granulométrica.

### **3.6.3 Separação Magnética**

Os materiais são afetados de alguma maneira pela presença de um campo magnético. Os materiais tratados em processos de seleção de partículas magnéticas que são baseados no movimento diferencial de materiais no campo magnético podem ser divididos em duas categorias: materiais diamagnéticos e paramagnéticos <sup>(84)</sup>.

Os materiais diamagnéticos são repelidos por um campo magnético e se movem para posições de mais baixa intensidade de campo. Os materiais paramagnéticos são atraídos por um campo magnético e se movem para posições de mais alta intensidade de campo.



A magnitude de interação de um material com um campo magnético pode ser descrita em termos de suscetibilidade magnética  $X$ , onde:

$$X = M / H$$

Sendo que  $M$  é a intensidade de magnetização do material e  $H$  é o campo magnético aplicado.

A intensidade do campo ( $B$ ) dentro de um material sujeito a um campo magnético é dado por:

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

Onde  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo.

Para materiais diamagnéticos e paramagnéticos as relações entre  $M$  e  $H$  são aproximadamente lineares, ou seja, para um determinado material  $X$  é constante. O valor de  $X$  para materiais diamagnéticos é um valor negativo muito pequeno. Os materiais paramagnéticos têm um valor de  $X$  pequeno e positivo e o valor de  $X$  para os materiais ferromagnéticos é grande, porém, variável dependendo do campo magnético aplicado e da prévia história magnética da amostra.

Nos processos de separação magnética podem ser feitas duas divisões na intensidade de processo: alta ( $>100$  A/m) e baixa ( $<10$  A/m). As baixas intensidades de campo podem ser usadas para selecionar materiais que tenham alta mobilidade magnética de outro material que tenha baixa suscetibilidade, como por exemplo, a separação do  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  do  $\text{SiO}_2$ . Os componentes ferromagnéticos de resíduos podem ser separados via uma forte região magnética que remove os materiais magnéticos do fluxo.

Um cinturão magnético consiste de uma correia transportadora em volta de um magneto permanente. Os materiais magnéticos são atraídos pelo magneto contra a correia transportadora, esta por sua vez transporta o material retido para fora do campo magnético, onde ele se desprende da correia.

Os processos com alta intensidade são usados para separar materiais fracamente paramagnéticos das partículas presentes em processos à base de um fluxo. Esta é uma técnica que pode ser usada para separar materiais paramagnéticos de materiais não magnéticos diretamente do resíduo através de um forte campo magnético com alto gradiente.

### **3.6.4 Separação Eletrostática**

A concentração de uma determinada partícula sólida em uma mistura pode ser realizada utilizando as forças que atuam nas partículas carregadas ou polarizadas em um

campo elétrico. Uma vez que cada material tem características elétricas próprias ocorrem diferentes movimentos das partículas no campo e a seleção dentro de diferentes processos a base de um fluxo <sup>(84)</sup>.

Há três mecanismos principais pelos quais as partículas podem adquirir uma carga superficial: contato elétrico, indução de condutividade e bombardeamento de íons.

Tem sido observado que, quando dois diferentes materiais que estão em contato são movidos separadamente, acontece uma troca de carga, provavelmente ocasionado pela troca de elétrons. Repetidos contatos de partículas que são pobres condutoras elétricas resulta na formação de uma carga “estática”.

Na indução de condutividade, uma partícula sólida é colocada em um grande rotor na presença de um campo elétrico, a partícula irá desenvolver uma carga superficial por indução. As partículas condutoras irão, em um curto espaço de tempo, assumir o grande potencial do rotor, que é oposto ao do eletrodo sem descarga. As partículas não condutoras, ou seja, incapazes de adquirir carga do rotor permanecem polarizadas e são atraídas pelo rotor ou passam através do campo relativamente intactas. Um separador é colocado entre os dois processos para separá-los, como pode ser observado na

Figura 9.

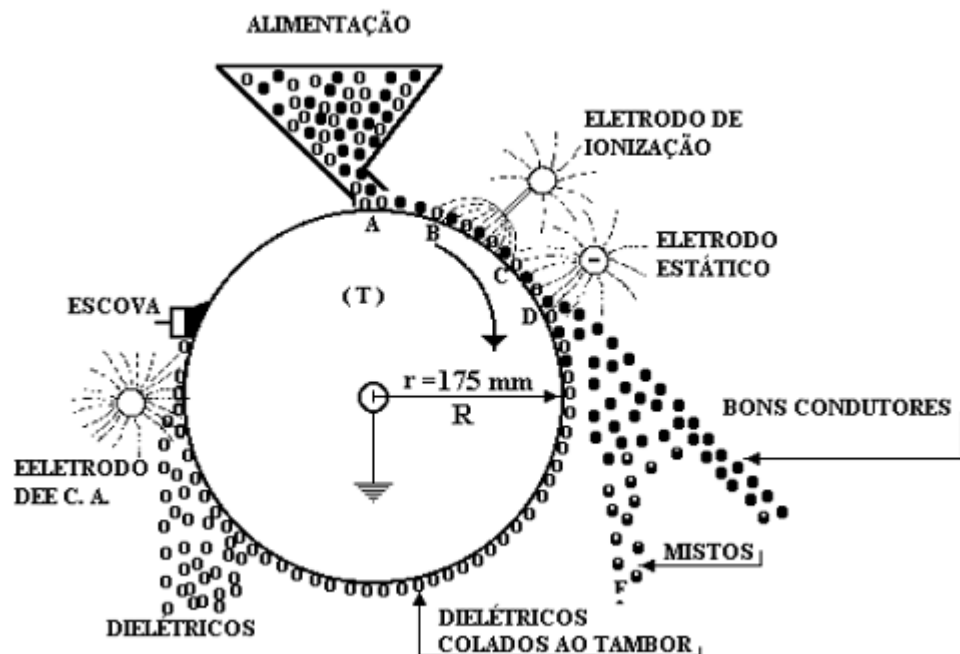


Figura 9: Diagrama esquemático de um separador eletrostático <sup>(86)</sup>.

### 3.6.5 Separação Gravimétrica

A separação e concentração gravimétrica é um processo físico que tem como princípio separar materiais de diferentes densidades. Esta é uma técnica usada originalmente na concentração de minérios e limpeza de carvões sendo atualmente utilizada em diversas áreas como a reciclagem de sucata eletrônica <sup>(13)</sup>.

O processo usualmente é realizado na água, mas o ar é usado em lugares onde a água é escassa ou quando há vantagens significantes para usa-lo. Uma vez que a separação é influenciada pela diferença de densidade e pelo tamanho da partícula, a água é usada preferencialmente, pois a diferença de densidade entre as partículas é mais pronunciada na água <sup>(35)</sup>.

Chao <sup>(87)</sup> em seu trabalho demonstra que é possível obter uma separação satisfatória entre metais e não metais utilizando um ciclone após a definição da relação entre tamanho de partícula e velocidade do gás. De acordo com Zhang <sup>(44)</sup> a separação de componentes eletrônicos baseada na diferença de densidade seria aplicável na separação entre polímeros e metais e entre alumínio e metais pesados e fibra de vidro.

Na separação gravimétrica, podem ser utilizados processos como Suspensões, Jigues, Líquidos Densos e Filmes de Águas, sendo os dois últimos utilizados neste trabalho.

#### 3.6.5.1 Suspensões

Suspensão pode ser definida como um líquido que mantém sólidos insolúveis dispersos em um estado de fluidização <sup>(88)</sup>. No caso da separação em meio denso, a suspensão é um sistema heterogêneo constituído de um sólido insolúvel disperso em água, que se comporta como um líquido, tais como magnetita e ferro silício <sup>(89)</sup>.

Para que se obtenha uma boa suspensão é necessário que o sólido apresente algumas características como:

- Dureza elevada: para evitar a degradação das partículas, que geram finos durante a operação aumentando a viscosidade da polpa;
- Estabilidade química: deve apresentar resistência à corrosão e não reagir com os materiais em estudo;
- Densidade elevada: para atingir a densidade de separação dos materiais, tendo o meio denso a viscosidade necessária do ponto de vista operacional;

- Recuperação fácil: o material utilizado na suspensão deve apresentar propriedades que permitam a recuperação do sólido e sua reutilização;
- Estabilidade de suspensão: o material sólido deve formar uma polpa estável;
- Granulometria: o material sólido deve apresentar uma distribuição granulométrica, que não eleve a viscosidade do meio excessivamente. A utilização de material (sólido) muito fino contribui para aumentar a viscosidade, além de dificultar a sua recuperação.
- Forma dos grãos: é aconselhável a utilização de grãos arredondados, pois os grãos angulosos diminuem a fluidez do meio e se degradam com mais facilidade.

O uso de suspensões foi desenvolvido para o beneficiamento de carvão mineral em função da baixa viscosidade de corte exigida, porém com o aperfeiçoamento da técnica, passou a ser utilizada no beneficiamento de outros minérios e materiais.

A separação por meio da suspensão é um processo baseado na diferença de densidade dos produtos que se deseja obter. Coloca-se o produto no líquido ou polpa com densidade intermediária, a fração que tem densidade superior a do meio, afunda e a fração que tem densidade inferior a do meio, flutua.

O uso da técnica está associado à realização de um corte com alta precisão que está relacionada com as propriedades hidrodinâmicas do material a ser separado e com as propriedades reológicas da suspensão, ou seja, a viscosidade deve ser a menor possível ao contrario da estabilidade de suspensão que deve ser a maior possível.

Industrialmente são utilizados três tipos de processos: soluções de sais, meios autógenos e suspensões. Na separação de carvão, industrialmente utilizou-se sais como o cloreto de cálcio dissolvido em água, no entanto em função dos altos custos esta operação deixou de ser usada em grande escala.

Os meios autógenos utilizados nos chamados *water-only-cyclones* correspondem a uma mistura de água com o material que se deseja concentrar. Nas suspensões, um sólido finamente cominuído é misturado com água com o objetivo de se obter uma polpa com densidade definida que aumenta com o aumento da quantidade de sólidos adicionados à polpa. No entanto, a adição de sólidos na polpa faz com aumente também a viscosidade aparente e após uma determinada concentração, a adição de uma pequena quantidade de sólidos faz com que a viscosidade aumente muito fazendo com que o seu uso se torne inviável.

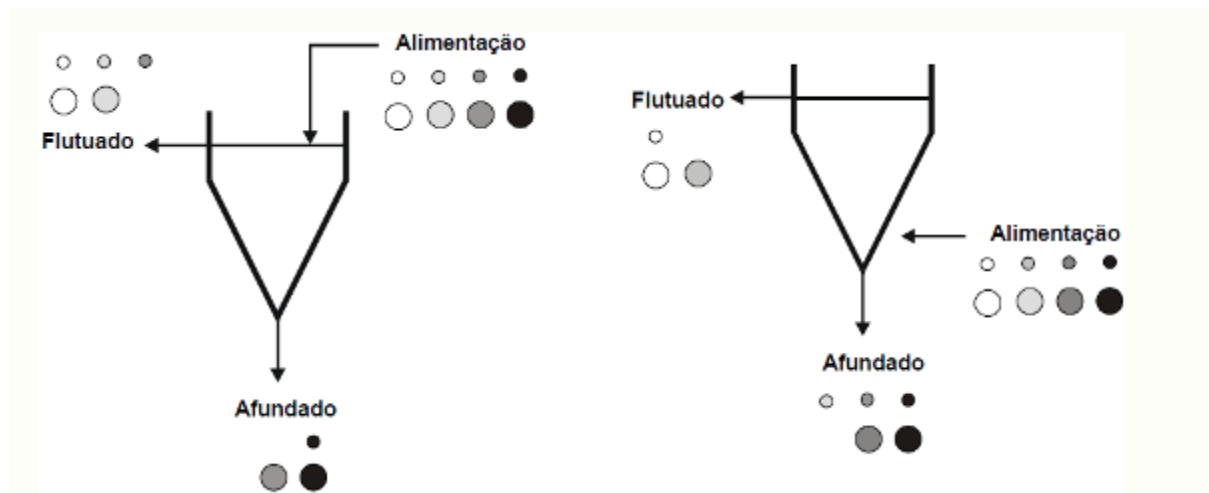
Uma característica importante do sólido que deve ser observada é a granulometria que quanto menor, maior será a estabilidade e a viscosidade da suspensão. Desta forma, de acordo com o processo, as partículas a serem utilizadas deverão ser maiores ou menores.

Industrialmente a separação a partir de técnicas de suspensões é realizada com dois diferentes métodos: separadores estáticos e separadores dinâmicos.

Nos separadores estáticos a força de campo dominante na separação da fração de flutuado da fração de afundado é a força da gravidade. Estes aparelhos são tanques que funcionam em processo contínuo, ou seja, o minério ou material e o meio denso são alimentados continuamente <sup>(88)</sup>.

Os separadores estáticos possuem elevada precisão de separação e desempenho pouco influenciados pelo tamanho da partícula quando comparados a separadores hidráulicos e pneumáticos. Porém, em função da agitação e da altura do separador, muitas vezes as partículas mais finas e aquelas com densidades próximas à densidade do meio, não têm tempo suficiente para afundar ou flutuar. O que está associado a uma baixa velocidade de sedimentação, causada pela alta viscosidade e pela tensão crítica do meio. Desta forma ao diminuir a granulometria da alimentação há a diminuição da precisão de separação.

A Figura 10 ilustra diferentes formas de alimentação em separadores a meio denso.



**Figura 10: Formas de Alimentação em Separadores Estáticos.** <sup>(88)</sup>

Os separadores dinâmicos utilizam força centrífuga, através do movimento da polpa e material, desta forma ocorre a separação do afundado e do flutuado mais rapidamente. A principal vantagem em relação aos separadores estáticos está a maior capacidade de

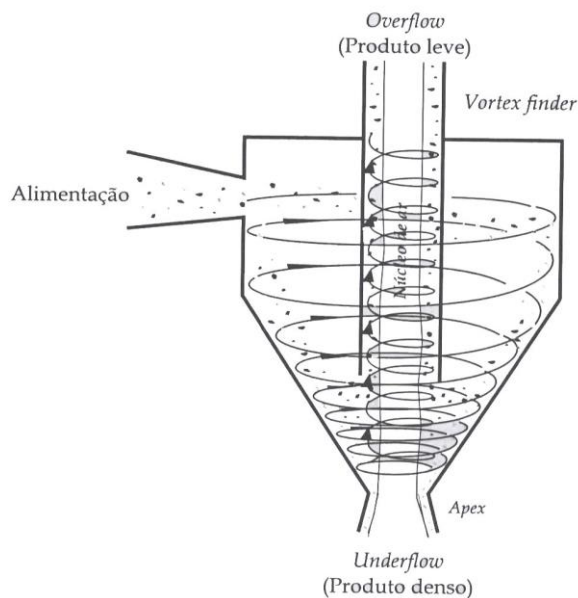
processamento por unidade de volume e a possibilidade de separar eficientemente partículas mais finas.

Os principais equipamentos utilizados pela indústria são: ciclones, separador Vorsyl, separador Dynawhirpool, separador Tri-Flo, separador Turpinson e os ciclones autógenos.

#### - *Ciclones*

O ciclone a meio denso é formado por duas seções, uma cilíndrica e uma cônica. No extremo da seção cilíndrica há um tubo, onde o produto leve é retirado, no extremo da seção cônica ocorre a retirada do produto pesado.

A alimentação é realizada tangencialmente ao corpo do ciclone e próxima ao topo da seção cilíndrica. A alta força centrífuga possibilita a separação de partículas granulométricas mais finas do que por outros métodos (Figura 11).



**Figura 11: Diagrama Esquemático de um Ciclone<sup>(88)</sup>**

#### - *Separador Dynawhirpool*

Este separador foi desenvolvido originalmente para o beneficiamento de minério de chumbo e zinco, atualmente ele é utilizado também no beneficiamento de materiais como: carvão, minérios metálicos e não metálicos.

Como observado na Figura 12, o separador Dynawhirlpool tem a forma de um cilindro com duas entradas e duas saídas localizadas em seus extremos e opera com ângulos de repouso de 15° e 25° em relação à horizontal.

A alimentação consiste em uma mistura de minério e parte do meio-denso. O meio denso é injetado tangencialmente e sob pressão pelo extremo inferior do cilindro, formando um fluxo em forma de vórtice e um núcleo central de ar. O material com densidade menor que a do meio-denso permanece no centro do cilindro e é descarregado na extremidade oposta à alimentação. O material denso é forçado a penetrar através do meio-denso na direção da parede do equipamento, sendo carregado juntamente com ao fluxo do meio-denso até o orifício lateral superior do separador <sup>(88)</sup>.

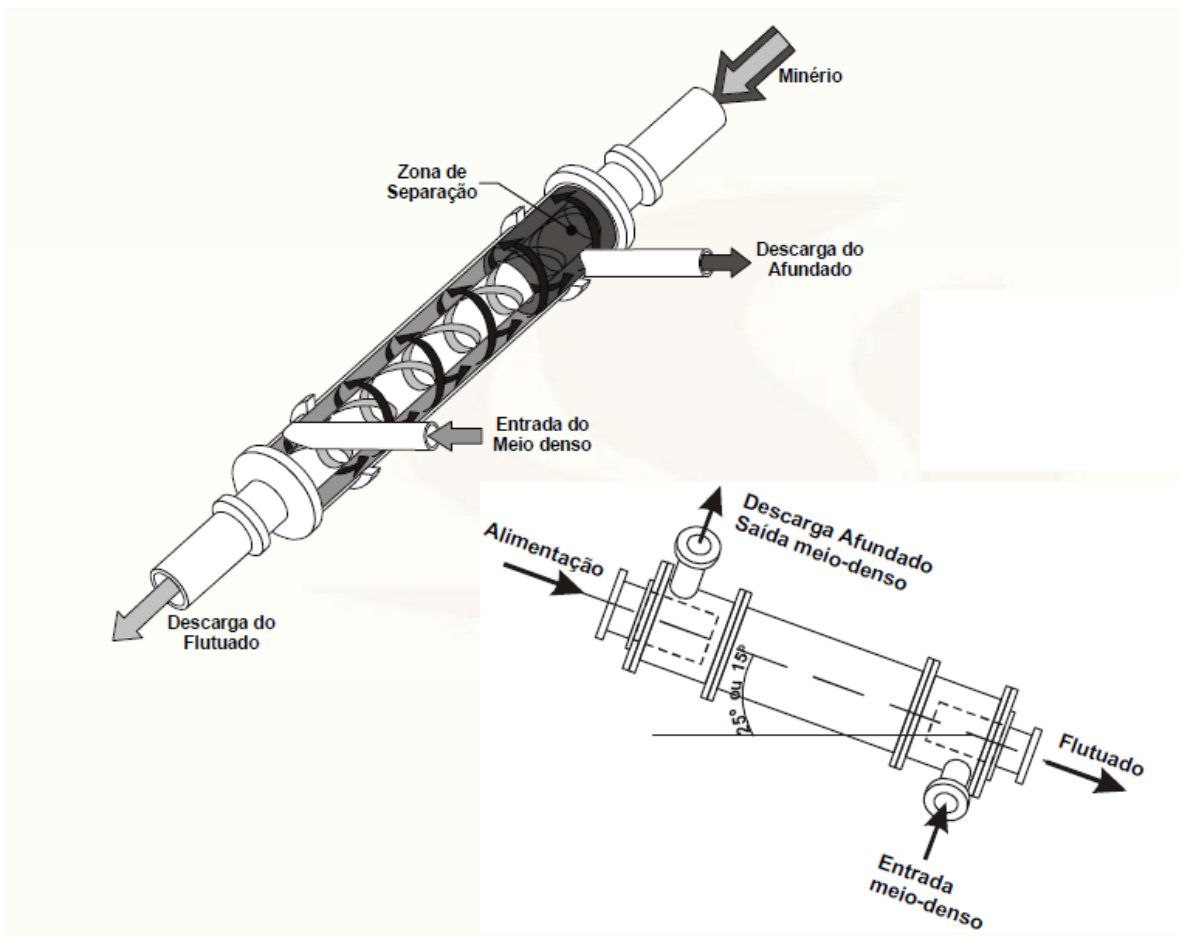


Figura 12: Separador Dynawhirlpool. <sup>(88)</sup>

#### - Ciclones Autógenos

Os ciclones autógenos também chamados de water-only cyclones, são usados desde a década de cinquenta para a separação de minérios. As principais vantagens destes

equipamentos são: ocupam pouco espaço, necessitam de pouca manutenção, formam uma polpa com a água e o material a ser separado além de baixos custos.

#### 3.6.5.2 Jigues

A concentração em jigues é um dos processos mais amplamente utilizados na concentração gravimétrica. A jigagem é um processo de separação hidráulica que consiste na repetida dilatação seguida de compactação vertical de um leito de partículas pelo movimento da água. O resultado é a separação das partículas em camadas onde a densidade é crescente do topo até a base.

Segundo Burt <sup>(90)</sup>, aceleração diferencial da partícula é a aceleração inicial no início do movimento da partícula. Esta aceleração depende apenas da densidade relativa do material e do fluido. Desta forma, considerando a aceleração diferencial no início do movimento, seria possível separar partículas de diferentes densidades sem qualquer influência do tamanho das partículas <sup>(88)</sup>.

Para obter resultados satisfatórios na concentração com jigues, alguns fatores devem ser observados:

- Alimentação: distribuição granulométrica e densimétrica da alimentação.
- Condições operacionais: densidade e viscosidade do fluido, velocidade e aceleração do meio, tipo de diagrama de jigagem, altura do leito, quantidade de água e taxa de alimentação.

A distribuição granulométrica e a proporção de finos devem ser mantidas as mais constantes possíveis para manter a regulação do jigue mais adequada a uma determinada distribuição granulométrica de alimentação <sup>(91)</sup>.

Como mostra Hori <sup>(92)</sup> em seu artigo, é possível usar o jigue para diversas finalidades entre elas a separação de diferentes polímeros em um jigue do tipo TACUB, onde foi possível uma recuperação de 99,8% dos materiais.

Há diversos tipos de jigues entre eles destacam-se: o Jigue Batac de Grosseiros e Jigues de Pistão e Jigues de Finos.

#### ***Jigue Batac***

Como o observado na Figura 13 o jigue Batac possui câmaras de ar posicionadas abaixo do crivo do jigue, que sustenta o leito de partículas que serão beneficiadas. Quando



uma pressão de ar é aplicada na câmara através de dutos, o nível da água baixa o que faz com que o nível da água que está junto ao material suba resultando na expansão do leito do material particulado. Após algum tempo, a pressão de ar dentro da câmara volta a baixar, ocorrendo o rebaixamento do nível de água junto ao leito de partículas e consequentemente a compactação do leito. Desta forma, com a elevação do e a redução da pressão de ar na câmara é possível expandir e compactar o leito de partículas <sup>(88)</sup>.

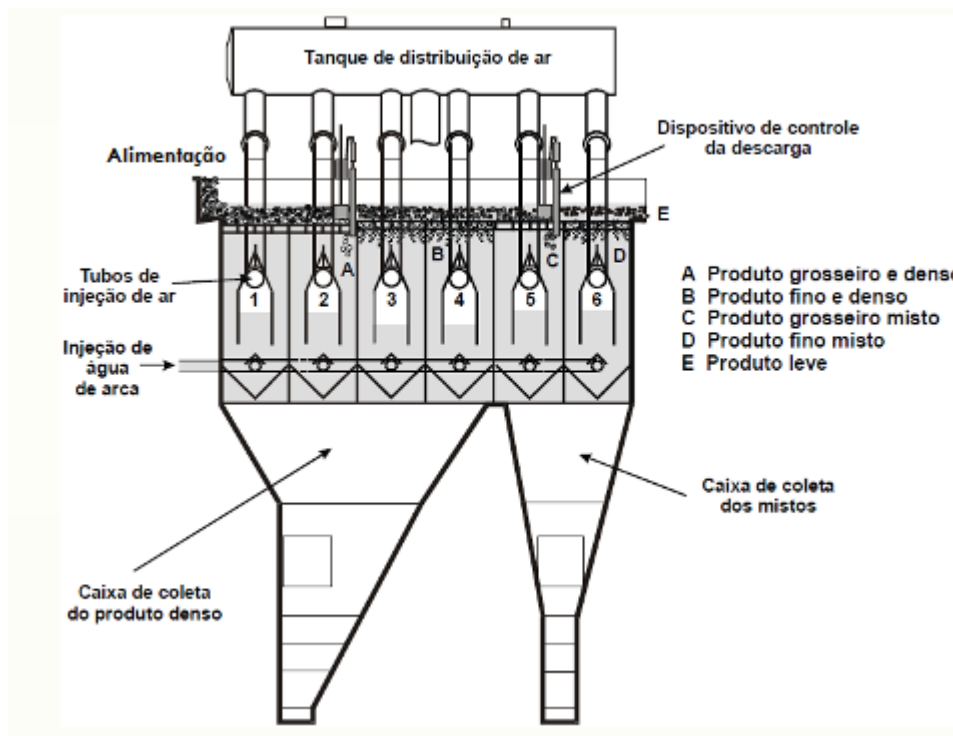
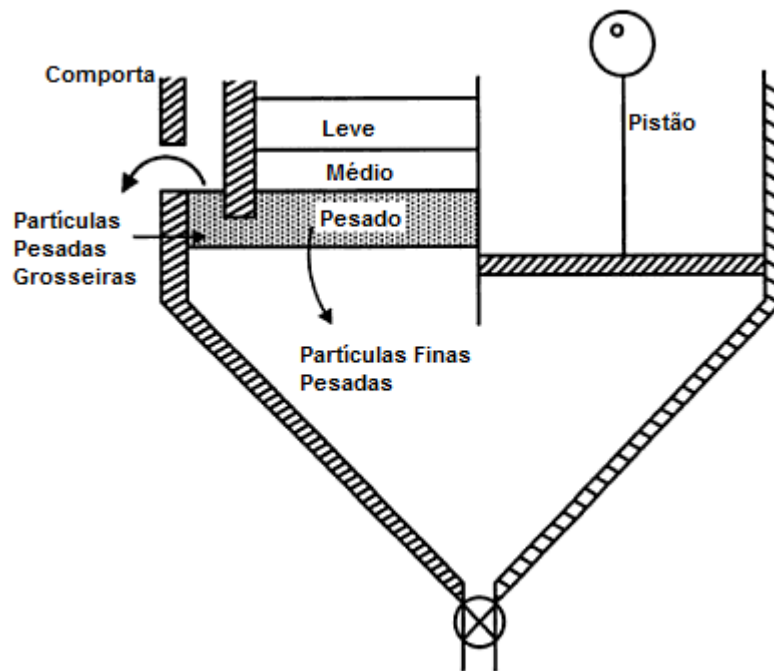


Figura 13: Jigue Batac. <sup>(88)</sup>

### ***Jigue Harz***

É um dos tipos de jigues mais antigos ainda em uso, foi desenvolvido inicialmente para o beneficiamento de minérios de chumbo e zinco. O jigue Harz consiste de um recipiente prismático com fundo inclinado, apresentando na parte superior dois compartimentos sendo um deles uma câmara de separação do aparelho que possui no fundo um crivo fixo e o outro compartimento, atua um êmbolo que transmite um movimento alternante vertical à água como pode ser observado na Figura 14. A principal vantagem deste jigue é a simplicidade mecânica e construtiva <sup>(88)</sup>.



**Figura 14: Jigue Harz. Adaptado de Fuerstenau et al<sup>(93)</sup>.**

### 3.6.3.3 Líquidos Densos

A separação de misturas de materiais sólidos em frações de diferentes densidades com limites definidos; também conhecido como ensaio de afunda-flutua é uma das técnicas laboratoriais mais úteis, podendo ser utilizada para uma variedade de aplicações como <sup>(88,90)</sup>:

- A avaliação da aplicabilidade de métodos gravimétricos de concentração;
- No projeto e na simulação da separação em meio-denso;
- Na determinação do grau de liberação do material; e
- Avaliação da eficiência de processos de separação como flotação, classificação mecânica,...

O ensaio consiste na introdução de uma amostra representativa e previamente pesada, em um recipiente que contenha um líquido de densidade conhecida, na obtenção das frações flutuada e afundada e na coleta da amostra. Após a coleta da amostra as frações, afundado e flutuado, devem ser lavadas com um solvente e então ser secadas e pesadas <sup>(88)</sup>.

São usados três métodos de análise para líquidos densos:

- Simple análise de afunda-flutua:

Nesta técnica, as amostras são submetidas a uma simples separação de afunda-flutua, gerando dois produtos que pesados e analisados. Este é um método barato, rápido e simples, geralmente usado em análises de rotina ou para procedimentos analíticos específicos <sup>(90)</sup>.

- Completa análise de afunda-flutua:

É muito semelhante à técnica anterior, a diferença é que diversas separações são realizadas em uma faixa de valores de densidade e a fração afundada ou flutuada é usada em um novo ensaio <sup>(90)</sup>.

- Análise por faixas densimétricas:

Nesta técnica, a amostra é separada em três ou mais frações em uma única operação. Há diversas variações na técnica, no entanto, há apenas duas formas para realizar a separação. Uma delas é usando uma coluna, onde a densidade cresce continuamente formando um gradiente até o topo. A outra é incrementar zonas de densidade no topo de cada uma. Embora o método tenha aplicações especiais, este é extremamente útil (principalmente em ensaios iniciais), a técnica requer considerável experiência para produzir bons resultados <sup>(90)</sup>.

De acordo com a densidade de corte desejada, é possível obter três tipos de separação:

- Baixa densidade de separação:

Aplicável ao carvão, minerais e materiais de baixa densidade. Pode ser feito em soluções aquosas de sal metálico como o cloreto de zinco com densidade maior que 1,8 g/cm<sup>3</sup> <sup>(90)</sup>.

- Média densidade de separação:

Geralmente feitas com Tetrabromoetano, TBE, (densidade de 2,96 g/cm<sup>3</sup>) ou Bromofórmio (densidade de 2,85 g/cm<sup>3</sup>) diluídos em Acetona (densidade de 0,79 g/cm<sup>3</sup>) para preparar soluções com diferentes densidades. Este sistema foi usado originalmente para a separação de minérios de sulfatos com gangas de silicato por causa da disponibilidade dos solventes orgânicos e custo moderado. A acetona é usada como diluente e também para retirar

o solvente dos produtos separados. Uma vez que acetona é miscível em água, os líquidos orgânicos podem ser recuperados das soluções por decantação da água <sup>(90)</sup>.

○ Alta densidade de separação:

Para obter uma densidade de até 5 g/cm<sup>3</sup> pode-se usar uma solução de Clerici (1:1 de Tl(CHO<sub>2</sub>) e Tl(C<sub>3</sub>H<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) em água), uma vez que a solubilidade do sal aumenta com o aumento da temperatura, densidades superiores a 4,2 g/cm<sup>3</sup> podem ser obtidas a altas temperaturas.

Para densidades superiores a 5 g/cm<sup>3</sup> há duas possibilidades. Uma delas é o uso do líquido de Cargille, que são suspensões de metais pesados em uma fase orgânica. Com o líquido de Cargille, pode-se obter uma densidade de até 7,5 g/cm<sup>3</sup>. Outra possibilidade é usar a emulsão de mercúrio-bromofórmio, em escala de laboratório, que atinge uma densidade máxima de 7 g/cm<sup>3</sup>, podendo ser utilizados em partículas tão pequenas quanto 0,1mm <sup>(90)</sup>. A Tabela 4 apresenta alguns líquidos densos, bem como suas respectivas densidades.

**Tabela 4: Líquidos Densos Empregados em Ensaio de Afunda-Flutua e suas Respectivas Densidades <sup>(88, 89)</sup>.**

Líquido Denso	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
H <sub>2</sub> O	1,0
NaCl + H <sub>2</sub> O	1,2
ZnCl <sub>2</sub>	1,75
CaCl <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	1,5
Bromofórmio	2,89
Acetona : TBE = 0,27:1	2,5
TBE	2,96
Solução de Clerici	4,28

#### 3.6.3.4 Filmes de Água

São assim chamados os processos que utilizam fluxo de água, geralmente com regime laminar para realizar a separação densimétrica. É utilizado no beneficiamento de materiais com granulometria inferior a 2,0mm. Equipamentos como: mesas concentradoras, calhas e espirais utilizam este princípio.

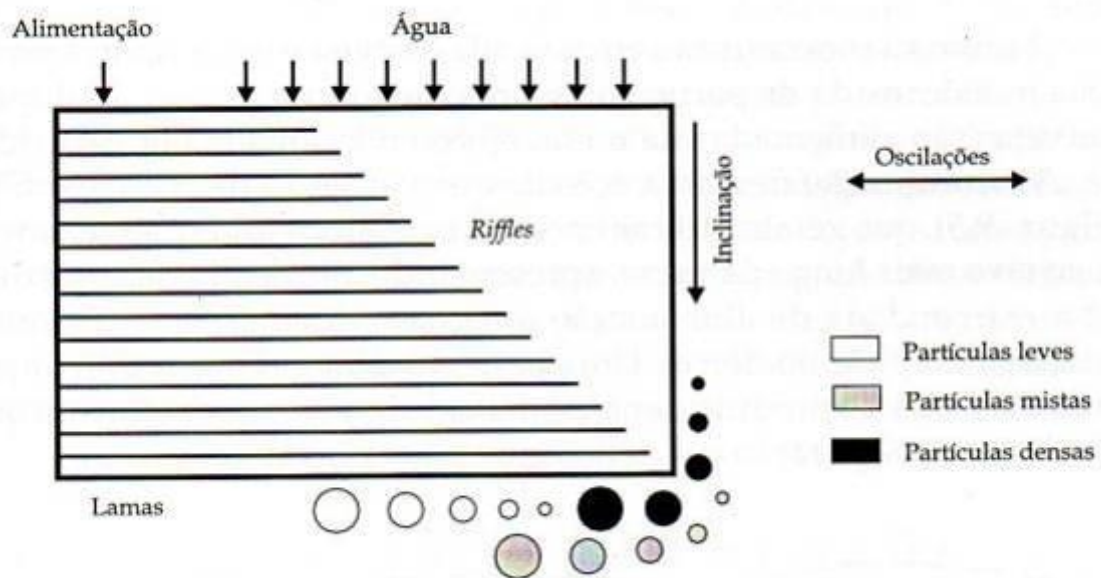
### ***Mesas Concentradoras***

As mesas concentradoras utilizadas atualmente, tem o mesmo princípio de funcionamento da mesa concentradora Wilfley (Figura 15) que consiste uma superfície plana com formato retangular, o deque. Este deque é coberto parcial ou totalmente por *riffles*. A mesa é oscilada com um movimento diferencial na direção destes, apresenta inclinações reguláveis que variam de 0 a 6° em relação à horizontal na direção transversal aos *riffles*. A água de lavagem é distribuída ao longo de toda a mesa, na extremidade junto à alimentação, formando uma película que escoar perpendicularmente aos *riffles*, na direção transversal do deque.



**Figura 15: Mesa Concentradora Wilfley.** <sup>(94)</sup>

O material é alimentado em uma extremidade da mesa através de uma caixa de distribuição e se espalha ao longo da mesa sendo descarregado na extremidade oposta, como mostrado na Figura 16. A água é distribuída ao longo de toda a mesa juntamente com o material, formando uma película sobre toda a superfície do equipamento. Em escala de laboratório a taxa de alimentação destas mesas varia entre 25 – 70 kg/h <sup>(94)</sup>.

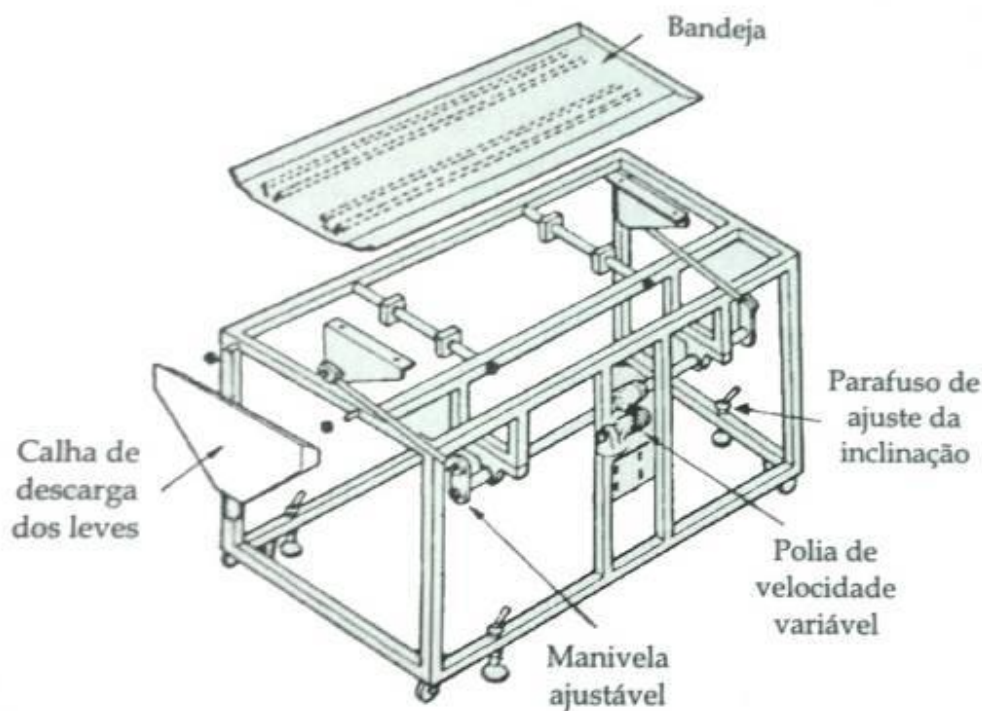


**Figura 16: Arranjo Típico das Partículas<sup>(88)</sup>.**

A concentração de materiais em mesas concentradoras tem três mecanismos principais: a velocidade diferencial das partículas em uma película de água, o movimento de oscilação do deque que é transversal ao escoamento da película de água e a estratificação de partículas entre os *riffles*.

Para a operação em laboratório, para pequenas quantidades de amostra (50 – 100g), usa-se o Separador Mozley que é considerado o aparelho mais preciso de concentração em película de água.

O equipamento consiste essencialmente de um deque (bandeja) de separação sem *riffles* ligeiramente inclinado em uma direção oscilando em simples movimentos harmônicos (Figura 17).

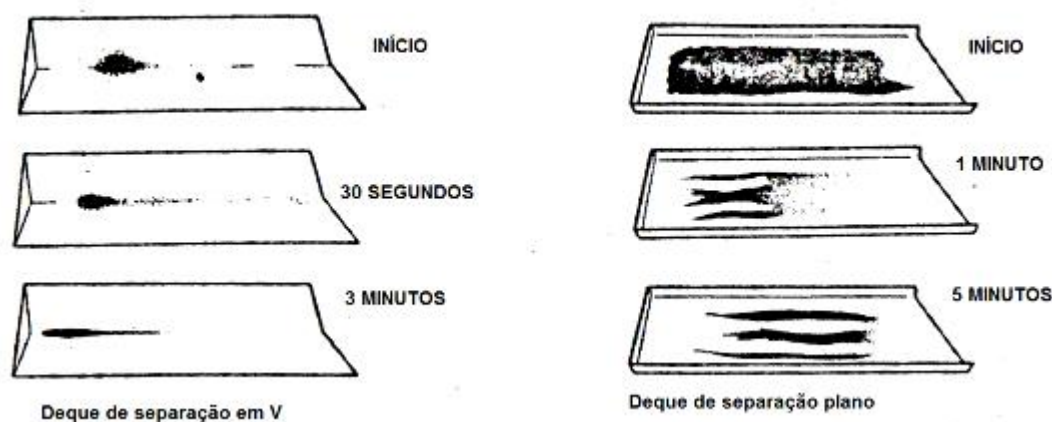


**Figura 17: Separador Mozley <sup>(88)</sup>.**

Com o equipamento acompanham dois deques: um plano e outro em forma de V. O deque plano é usado para a concentração de partículas finas, na faixa de 0,01 a 0,1 mm e para concentrar partículas mais grosseiras, na faixa de 0,1 a 2,0 mm usa-se o deque em forma de V que possui um ângulo interno de 165°. A bandeja é inclinada longitudinalmente na direção da calha de coleta do produto leve.

A operação do separador é similar para ambas as bandejas. A amostra é colocada na parte superior da bandeja, é molhada e então a bandeja oscila por um tempo pré-determinado. As partículas com maior densidade (pesados), tendem a ficar presas à bandeja e aquelas com menor densidade (leves) tendem a descer à bandeja para a calha de descarga. O tempo médio de separação é de 3 a 5 minutos. A Figura 18 mostra o comportamento da amostra durante a operação. Os parâmetros que podem ser variados são:

- O tipo de deque;
- A inclinação longitudinal onde, para a separação de partículas mais leves usa-se um ângulo menor;
- A frequência de oscilação;
- A amplitude e
- A vazão da água.



**Figura 18: Modo de Operação do Separador Mozley. Adaptado de Burt <sup>(90)</sup>.**

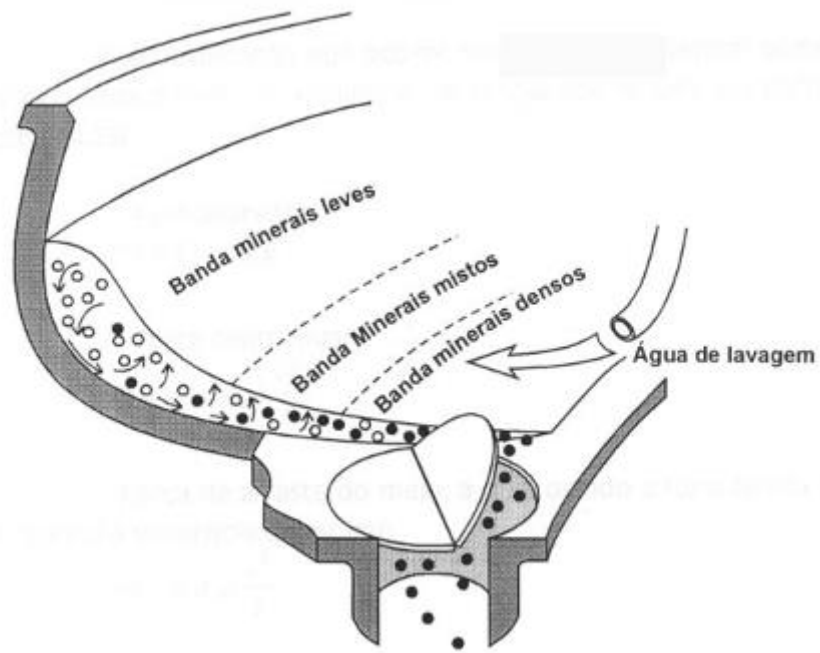
Rao <sup>(95)</sup> em seu artigo apresenta um estudo para separar carvão dos rejeitos deste, usando um separador Mozley. Entre os parâmetros estudados está a inclinação que variou entre 0,25 a 0,75°; a vazão de água (0,4 – 1,0L/min); a velocidade de oscilação variou de 60 a 80rpm e os parâmetros mantidos fixos foram: a massa da amostra de 100g, a duração do experimento de 90s e a amplitude de 63,5mm. Ao final dos estudos, os autores concluíram que o desenvolvimento desta técnica de processamento será útil para aumentar a economia nas operações de lavagem e para a eliminação de resíduos.

### ***Espirais***

As espirais foram originalmente aplicadas no beneficiamento de frações finas de carvão e rejeitos de flotação. Estes equipamentos são constituídos basicamente de uma calha em forma de helicoide ou espiral, que separa as partículas finas e pesadas em diferentes fluxos, sendo removidas separadamente.

A espiral é alimentada sob a forma de polpa. Esta polpa flui ao longo do eixo da espiral e desta forma ocorre a estratificação em um plano vertical. As partículas pesadas seguem para o eixo central da espiral, onde a velocidade é mais baixa e as partículas leves concentram-se mais afastadas do eixo central onde a velocidade é maior (Figura 19).





**Figura 19: Fluxos Dentro de uma Espiral <sup>(88)</sup>.**

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

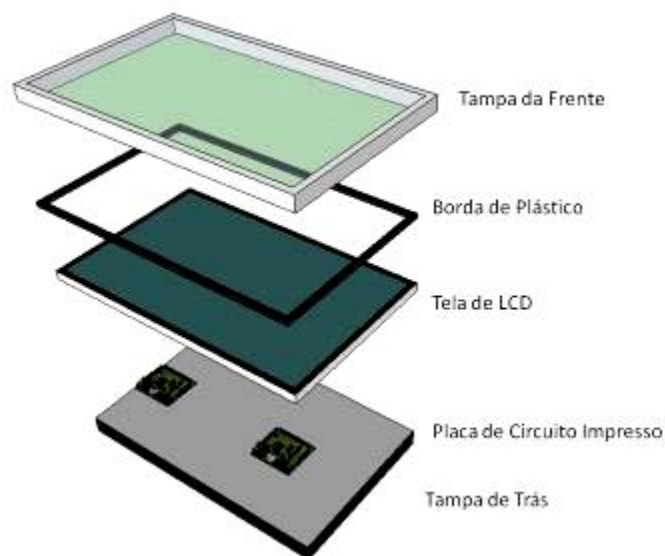
A metodologia deste trabalho foi dividida em dois principais capítulos. O primeiro refere-se às etapas de caracterização dos materiais presentes nos monitores/telas de LCD, incluindo a placa de circuito impresso, assim como a caracterização da periculosidade destes resíduos. O segundo capítulo refere-se às etapas de processamento mecânico das placas de circuito impresso para obter as frações concentradas em diferentes materiais.

### **4.1 Caracterização de Monitores/Telas de LCD**

Foram coletados em assistências técnicas monitores inteiros de LCD e telas avulsas de LCD. Sendo que as telas e monitores são todos equipamentos danificados. Para a realização deste trabalho foram utilizados 27 aparelhos, conforme pode ser observado na Tabela 5, sendo considerado Monitor as amostras que continham tela de LCD, tampas, bordas e placas de circuito impresso. A diferença entre tela e monitor pode ser visualizada na Figura 20. As dimensões dos aparelhos variam entre 14 e 42 polegadas.

**Tabela 5: Monitores e Telas Utilizadas.**

MONITORES			
Marca	Nº Amostras	Tamanho (polegada)	Massa Média (kg)
A	1	14	1,6
B	1	17	3,7
	2	19	6,5
C	1	19	5,5
D	1	32	12,1
TELAS			
Marca	Nº Amostras	Tamanho (polegada)	Massa média (kg)
B	2	20	1,45
C	1	21	2,2
	1	26	3,5
	6	32	5,3
E	3	15,6	1,1
F	4	15,6	1,2
	1	31	4,5
	1	42	9,5
G	1	15,6	1,3
	1	18,5	2,0



**Figura 20: Esquema de um Monitor de LCD.**

Cada monitor/tela foi previamente pesado e então foi desmontado manualmente, retirando os parafusos, abrindo o monitor, retirando placas de circuito impresso e soltando a base do monitor. À medida que as peças iam sendo retiradas, estas eram identificadas em dois grupos e pesadas: o primeiro grupo consistia da parte polimérica externa do monitor, assim como cabos, partes metálicas, parafusos e lâmpadas. O segundo grupo consistia dos materiais presentes na tela de LCD como as folhas difusoras, vidro polarizado e PCI.

Após a etapa de pesagem, foi realizada a caracterização dos principais componentes: carcaças poliméricas externas, material das telas e as placas de circuito impresso.

#### **4.1.1 Caracterização das Carcaças Poliméricas Externas**

Após a etapa de desmontagem, as carcaças poliméricas externas foram caracterizadas a fim de verificar o(s) tipo(s) de polímero(s) utilizado(s) na sua fabricação. Algumas carcaças apresentavam gravadas na sua superfície interna o símbolo indicando a sua composição. As carcaças que não apresentavam esta identificação foram caracterizadas através da técnica de FTIR (marca Perkin Elmer, modelo Spectrum 100).

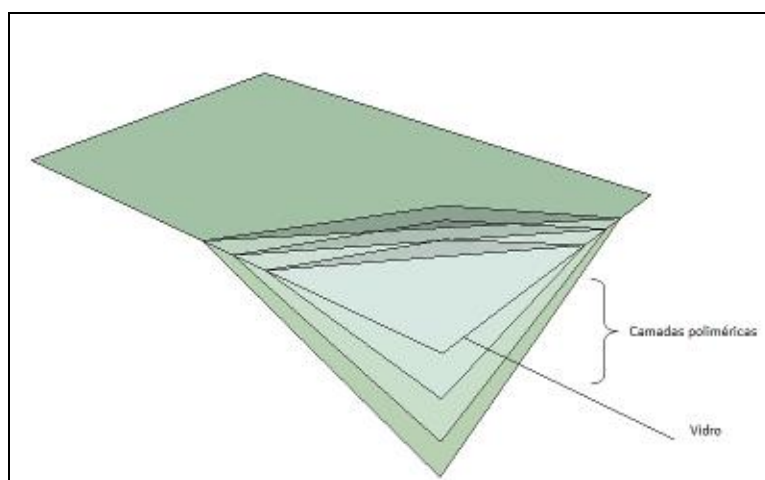
#### **4.1.2 Caracterização das Telas de LCD**

As telas de LCD, por serem uma estrutura multicamadas de diversos materiais, apresentaram uma maior dificuldade quanto a sua caracterização, devido a dificuldade de

separação entre cada uma das camadas. As partes poliméricas foram caracterizadas através de FTIR, enquanto as partes vítreas foram caracterizadas através de microscopia óptica no microscópio óptico da marca Zeiss, modelo Axio Lab.A1, MEV/EDS da JEOL modelo JSM 5800 e Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX) da marca SHIMADZU, modelo XRF-1800.

Análises de Microscopia Óptica foram realizadas nas camadas de vidro (dianteira e posterior) com o objetivo de permitir uma melhor visualização das estruturas (TFT e pixels), enquanto o EDS e FRX foram utilizados para caracterizar qualitativamente as suas composições.

As camadas de vidro possuem aderidas a sua superfície uma película composta de três camadas poliméricas cada uma, conforme o observado na Figura 21. A fim de remover estas camadas, o material foi colocado em contato com acetona, ocorrendo então a separação da película em 3 fases, sendo uma delas um material polimérico escuro (a), outra de um material com textura gel (b) e a última fase obteve-se apenas após a evaporação da acetona (c), conforme o ilustrado na Figura 22.



**Figura 21: Camadas Poliméricas.**



a – polímero escuro      b- material com textura gel      c- polímero claro

**Figura 22: Fases das Camadas Poliméricas.**

### 4.1.3 Caracterização das Placas de Circuito Impresso

As placas de circuito impresso, por serem estruturas também extremamente complexas, foram caracterizadas através da digestão ácida dos metais constituintes.

As placas de circuito impresso foram caracterizadas apenas quanto a sua fração metálica, onde foram quantificados os metais de maior interesse econômico. Os metais quantificados foram: alumínio, cobre, ferro, chumbo, ouro, prata, zinco e níquel.

Para a realização desta etapa de caracterização as PCI's passaram por diversos procedimentos descritos nos itens seguintes.

#### Cominuição

As placas de circuito impresso foram cominuídas de duas maneiras diferentes: utilizou-se uma grade no moinho com abertura de 1,00 mm; e posteriormente utilizou-se uma grade de 0,25 mm. Foi utilizado um moinho de martelos marca Tigre, modelo A4R para a moagem grosseira, e um moinho de facas marca Retsch, modelo SM2000 para a obtenção de partículas finas. (Figura 23 e Figura 24).



**Figura 23: Moinho de Martelos**



**Figura 24: Moinho de Facas**

### **Classificação**

Após a etapa de cominuição, o material moído passou pela etapa de classificação granulométrica. Esta etapa foi realizada com separador granulométrico da marca Retsch, equipado com um conjunto de peneiras de diversas aberturas.

O procedimento de classificação consistiu em colocar o material na peneira com menor *mesh*, deixar em agitação por 30 minutos e recolher as frações do material. O material que atingia a granulometria esperada era separado; enquanto que o material com tamanho maior voltava para a etapa de cominuição.

Na classificação do material da primeira moagem (todo o material estava abaixo de 1,00 mm) utilizou-se uma peneira de 1,00 e outra de 0,25mm. O material acima de 1,00mm voltava para o moinho e o material abaixo de 0,25mm ficou reservado. Desta forma, obtiveram-se duas amostras: uma com tamanho de partículas menor que 1,00mm e maior que 0,25mm e outra amostra com tamanho de partícula menor que 0,25mm. O material do segundo tipo de moagem (a grade utilizada no moinho foi de 0,25mm) não precisou ser classificado, pois o objetivo era ter uma amostra com tamanho de partícula menor que 0,25mm.

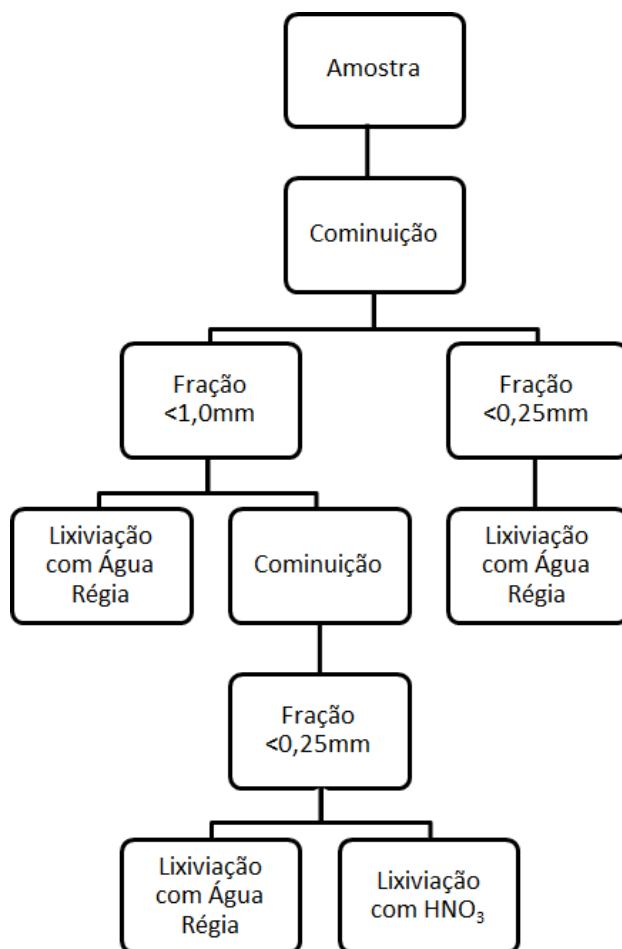
### **Caracterização da Fração Metálica**

A caracterização da fração metálica das PCI foi realizada lixiviando as amostras com água régia ( $1\text{HNO}_3:3\text{HCl}$ ) e com ácido nítrico P.A., sendo o último com a finalidade de

quantificar a prata com maior precisão. Na caracterização foram utilizadas amostras com granulometria menor que 0,25 mm e entre 1,00 e 0,25mm. Ao total foram realizadas quatro caracterizações com as seguintes amostras:

- amostra com granulometria menor que 1,00 mm e maior que 0,25 mm foi lixiviada com água régia;
- amostra com granulometria menor que 0,25 mm foi lixiviada com água régia;
- duas amostras com granulometria menor que 0,25mm que são provenientes da primeira amostra, ou seja, foi realizada a caracterização da fração que não foi utilizada nos ensaios com o concentrador Mozley, em função do tamanho da partícula. Estas lixiviações foram realizadas com água régia e com ácido nítrico.

O fluxograma da Figura 25 ilustra a rota utilizada para obter as frações a serem caracterizadas.



**Figura 25: Fluxograma com as frações utilizadas para caracterizar as PCI.**



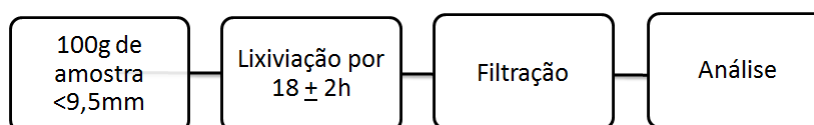
As amostras foram quarteadas e lixiviadas por 2h a uma temperatura de 60°C utilizando uma proporção sólido:líquido igual a 1:20 sob agitação magnética e em sistema de refluxo. Análises de espectroscopia de absorção atômica por chama em um equipamento da marca Varian, modelo FS240 e espectroscopia de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP-AES, modelo Optima 7300 DV, marca Perkin-Elmer) foram utilizadas para quantificar os metais presentes na PCI.

#### 4.1.4 Caracterização quanto a periculosidade

Após a desmontagem das telas e monitores, uma classificação com relação a toxicidade foi realizada através das Normas Brasileiras de classificação de resíduos sólidos (NBR 10004; NBR 10005 e NBR 10006). Estas normas dividem os resíduos sólidos em 3 classes distintas: (Classe I – Perigosos; Classe II A – Não Inertes e Classe II B – Inertes). De acordo com a classificação, é possível avaliar a periculosidade do resíduo e definir o destino mais adequado, a fim de evitar a contaminação ambiental, nos casos em que o resíduo não é enviado para um processo de reciclagem.

Estes ensaios foram realizados separadamente com telas de LCD e com as PCI presentes neste resíduo. As telas e as PCI's foram cominuídas, peneiradas e lixiviadas em frascos de politetrafluoretileno como descrito nos procedimentos constantes na norma brasileira NBR 10005 (Figura 26). Foram utilizadas 100g de amostra que foi transferida para o frasco de extração contendo a solução extratora, em quantidade 20 vezes a massa da amostra. O frasco foi mantido sob agitação durante  $(18 \pm 2)$  h, à temperatura de até 25°C com uma rotação de  $(30 \pm 2)$  rpm utilizando um Agitador tipo Wagner (Figura 27).

Os materiais foram filtrados e os extratos lixiviados foram analisados. Os extratos obtidos das telas foram analisados por cromatografia iônica no Cromatógrafo Iônico Dionex ICS 3000 e os extratos das placas de circuito impresso por espectroscopia de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente, utilizando o equipamento ICP-AES, modelo Optima 7300 DV, marca Perkin-Elmer.



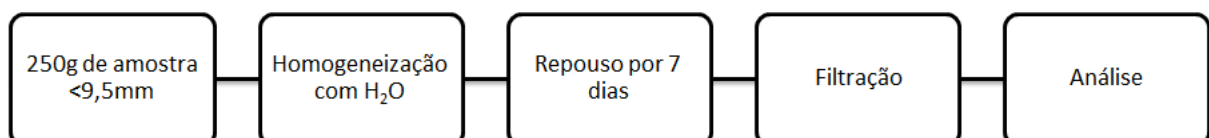
**Figura 26: Etapas do ensaio de lixiviação - NBR 10005.**



**Figura 27: Agitador tipo Wagner**

Após ensaios realizados de acordo com a NBR 10005 de obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos foram realizados novos ensaios, com as placas de circuito impresso, de acordo com a NBR 10006 de obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.

Neste ensaio, a amostra de 250g e com granulometria inferior a 9,5mm foi colocada em um frasco de 1,5 L. Após o recipiente foi completado com água destilada e deionizada até a marca de 1,0 L e foi homogeneizado por 5 minutos em baixa velocidade. Ao final a amostra foi coberta com filme de PVC, deixada em repouso por 7 dias, foi filtrada em membrana filtrante com 45 $\mu$ m de porosidade e encaminhada para análise por ICP-AES (Figura 28).



**Figura 28: Etapas do ensaio de lixiviação NBR 10006.**

## 4.2 Processamento Mecânico das Placas de Circuito Impresso

Nesta etapa do trabalho, foram utilizadas PCI's provenientes dos monitores LCD e PCI's genéricas de diversos tipos de equipamentos. As PCI's genéricas foram utilizadas apenas nos ensaios preliminares para testar variáveis e ajustar os equipamentos. Ambos os tipos de placas foram coletadas em assistências técnicas multimarcas.

As placas de circuito impresso provenientes das telas/monitores de LCD foram caracterizadas apenas quanto a sua fração metálica e já descritas anteriormente, onde foram quantificados os metais de maior interesse econômico. Para realizar o estudo do uso de processamento mecânico na concentração de materiais em diferentes frações, as PCIs passaram por etapas de cominuição e classificação. Na sequência, foram realizados os ensaios de separação em meio denso e separação no concentrador Mozley.

### Cominuição

As placas de circuito impresso foram cominuídas a diversas granulometrias:

- Granulometria menor que 0,25 mm, utilizada no ensaio de meio denso;
- Granulometria menor que 0,50 mm, utilizada no ensaio de meio denso;
- Granulometria menor que 1,0 mm, utilizada no ensaio de meio denso e ensaios na mesa Mozley;
- Granulometria menor que 2,0 mm, utilizada no ensaio de meio denso.

Os equipamentos utilizados foram os mesmos da etapa de caracterização. Um moinho de martelos marca Tigre, modelo A4R para a moagem grosseira, e um moinho de facas marca Retsch, modelo SM2000 para a obtenção de partículas finas.

### Classificação

Após a etapa de cominuição, o material moído passou pela etapa de classificação granulométrica. Esta etapa foi realizada com separador granulométrico da marca Retsch, equipado com um conjunto de peneiras de diversas aberturas.

O procedimento de classificação consistiu em colocar o material na peneira com menor *mesh*, deixar em agitação por 30 minutos e recolher as frações do material. O material que atingia a granulometria esperada era separado enquanto que o material com tamanho maior voltava para a etapa de cominuição.

#### 4.2.1 Separação em Meio Denso

Nesta etapa foram realizados ensaios de afunda – flutua com PCI genéricas a fim de definir o grau de liberação e qual a granulometria a ser usada, posteriormente, no concentrador Mozley.

Os ensaios em meio denso foram realizados com Tetrabromoetano 95% diluído em acetona com densidade de  $2,88\text{g/cm}^3$  e com Bromofórmio (densidade de  $2,89\text{g/cm}^3$ ). Foram utilizados dois meios em função da disponibilidade comercial destes. O líquido denso e as granulometrias usadas no ensaio foram:

- $-2,0 + 1,0$  mm (Bromofórmio);
- $-1,0 + 0,5$  mm (Tetrabromoetano);
- $-0,5 + 0,25$  mm (Tetrabromoetano);
- $-0,25$  mm (Bromofórmio).

Os ensaios foram realizados a temperatura ambiente, com duração de 0,5 horas sendo utilizada uma proporção sólido: líquido de 1:10. Em cada ensaio foi utilizado uma massa de 150g em média. Após o ensaio, as frações de afundado e flutuado eram lavadas com álcool comercial, colocadas para secar em estufa e então pesadas.

Na sequência, as frações afundada e flutuada foram lixiviadas com água régia por 2h em uma proporção sólido: líquido de 1:20 e então análises por espectroscopia de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP-AES) foram utilizadas para determinar o teor de metais que estava presente nas frações flutuado e afundado. A Tabela 6 indica a densidade teórica dos materiais presentes na PCI, sendo desta forma possível prever aqueles que estariam na fração afundada e na fração flutuada.

Após cada ensaio, o TBE foi filtrado com filtro de  $0,45\ \mu\text{m}$  e uma bomba de vácuo a fim de ser utilizado novamente em outro ensaio. O Bromofórmio foi utilizado em dois ensaios consecutivos, desta forma o mesmo não passou por nenhuma etapa posterior de limpeza.

**Tabela 6: Densidade de Materiais Presentes nas PCI.**

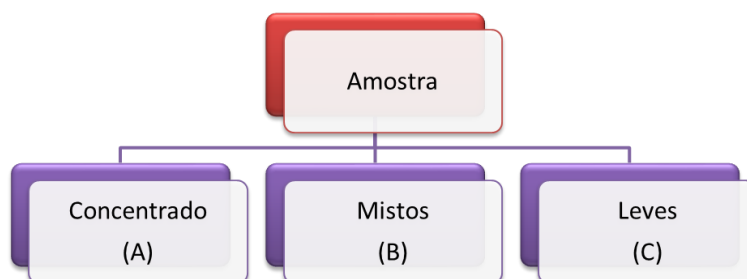
Material	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Material	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
Ouro	19,3	Cobre	8,9
Chumbo	11,3	Níquel	8,9
Prata	10,5	Ferro	7,9
Estanho	7,31	Zinco	7,14
Alumínio	2,7	Sílica	1,7 – 2,2

#### **4.2.2 Ensaios no Concentrador Mozley**

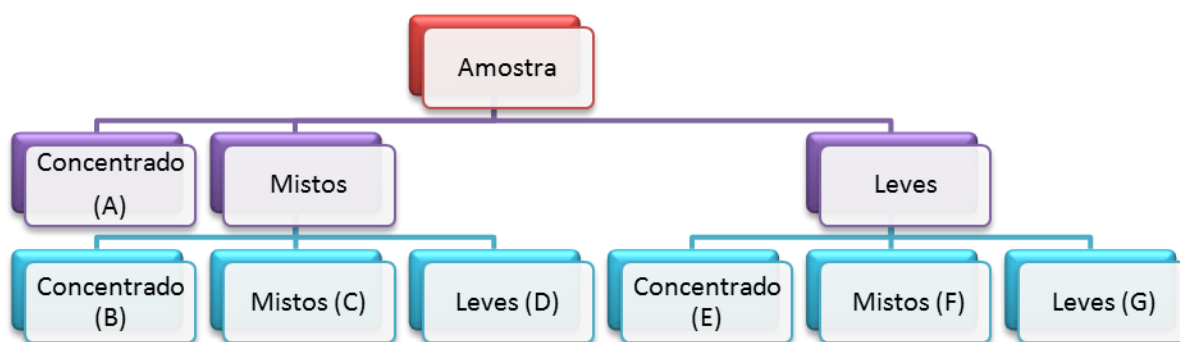
Após a determinação das melhores eficiências de separação, em função da granulometria, no ensaio de meio denso, foram realizados ensaios no concentrador Mozley. Neste ensaio foram utilizadas PCI genéricas e PCI provenientes de telas de LCD. As variáveis avaliadas neste ensaio foram: a vazão de água, inclinação da bandeja e número de etapas. As massas das amostras utilizadas durante o ensaio variam entre 50 e 100 g. As frações obtidas foram lixiviadas com água régia por 2h na proporção sólido:líquido 1:20. As soluções obtidas foram analisadas por Espectroscopia de Absorção Atômica por (AAS).

Em cada ensaio no concentrador Mozley é possível obter uma fração concentrada, uma mista e uma leve. Desta forma, foram estudadas 3 rotas diferentes, conforme demonstrado nos fluxogramas das Figuras 29, 30 e 31. Na Figura 30 pode-se observar que a fração de Mistos foi passada novamente no concentrador, da mesma forma que a fração Leve. Na Figura 31 a primeira fração Mista foi passada novamente, gerando uma segunda fração Mista que foi passada novamente no concentrador.

Na rota 1, Figura 29, foram realizados ensaios em triplicata, ou seja, 3 amostras distintas. Na rota 2, Figura 30, foi realizado apenas um ensaio com a quarta amostra e na rota 3, Figura 31, foram realizados 3 ensaios, com as amostras 5, 6 e 7 (utilizando PCI genéricas) e mais 8 ensaios (amostra 8 – 15) com o uso de PCI provenientes de monitores LCD.



**Figura 29: Fluxograma da Rota 1 do Ensaio com Concentrador Mozley.**



**Figura 30: Fluxograma da Rota 2 do Ensaio com Concentrador Mozley.**



**Figura 31: Fluxograma da Rota 3 do Ensaio com Concentrador Mozley.**

A Tabela 7 apresenta todas as variáveis estudadas nos ensaios com o concentrador Mozley, utilizando PCI genéricas. Estes ensaios foram realizados com o intuito de conhecer melhor o funcionamento do equipamento e também verificar condições iniciais de uso para posterior aplicação em PCI provenientes dos monitores LCD.

**Tabela 7: Parâmetros utilizados nos ensaios com o concentrador Mozley utilizando PCI genéricas.**

Amostra	Rota Utilizada	Vazão (L/min)	Inclinação (°)
1	1	0,4	0
2	1	0,4	0
3	1	0,4	0
4	2	0,4	0,26
5	3	0,4	0,50
6	3	0,4	0,26
7	3	0,8	0,26

A Tabela 8 apresenta as variáveis estudadas nos ensaios com o concentrador Mozley utilizando PCI de LCD. Em todos estes ensaios foi utilizada a rota 3 (Figura 31) e a vazão de 0,4 L/min foi mantida fixa.

**Tabela 8: Parâmetros utilizados nos ensaios com o concentrador Mozley utilizando PCI provenientes de LCD.**

Amostra	Frações Obtidas	Inclinação	Tempo (min)
8	A	0,26°	3
	B	0,26°	3
	C	0,26°	3
	D		
	E	0°	3
9	A	0,26°	3
	B	0,26°	2
	C	0°	3
	D		
	E	0°	10
10	A	0°	3
	B	0°	3
	C	0°	3
	D		
	E	0°	3
11	A	0,26°	1,5
	B	0,26°	1,5
	C	0,26°	1,5
	D		
	E	0,26°	1,5
12	A	0°	3
	B	0,26°	1,5
	C	0°	3
	D		
	E	0,26°	1,5
13	A	0,26°	1,5
	B	0°	3
	C	0,26°	1,5
	D		
	E	0°	3
14	A	0,26°	1,5
	B	0,26°	1,5
	C	0°	3
	D		
	E	0,26°	1,5
15	A	0,26°	1,5
	B	0°	3
	C	0,26°	1,5
	D		
	E	0°	3



## **5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

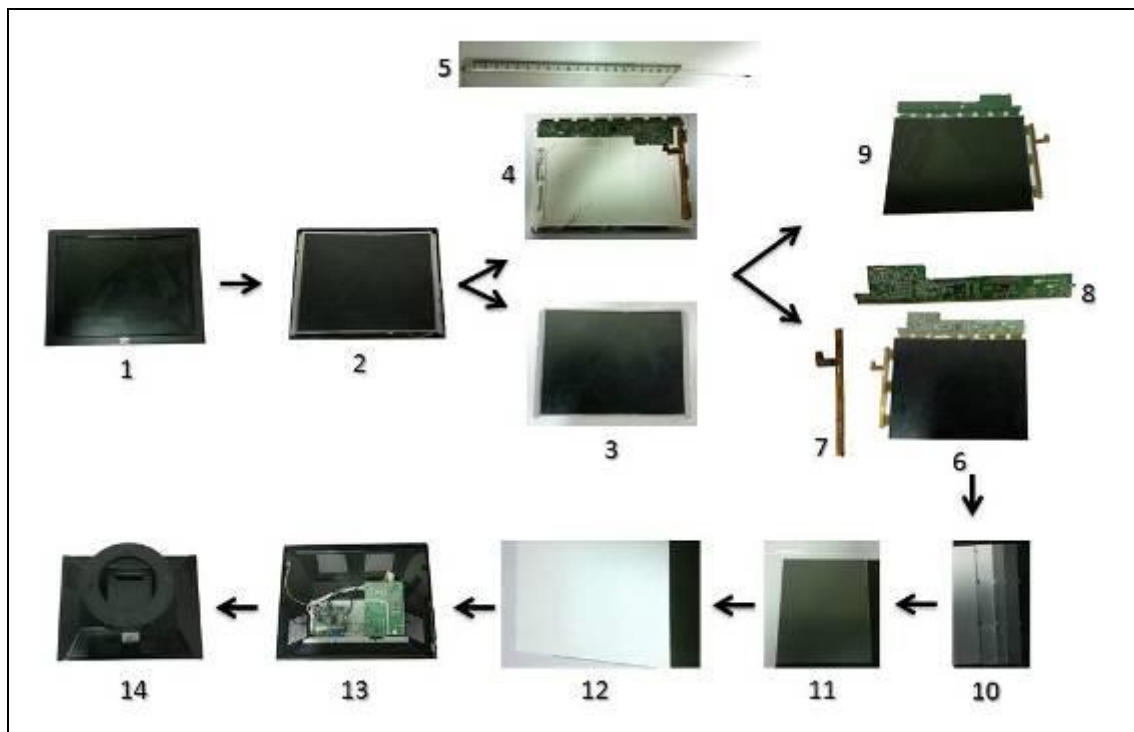
### **5.1 Caracterização das Telas/Monitores de LCD**

Após os monitores serem desmontados observou-se que há uma estrutura básica que se repete em todas as amostras, conforme observado na Figura 20.

- Tampa dianteira,
- Borda polimérica,
- Tela de LCD,
- PCI,
- Tampa posterior.

A Figura 32 mostra imagens de um monitor desmontado e seus diversos constituintes. Os itens de 1 a 14 mostram os diversos componentes que formam o monitor.

- Item 1: Frente do monitor;
- Item 2: Monitor sem borda plástica;
- Item 3: Frente da tela de LCD;
- Item 4: Parte posterior da tela de LCD;
- Item 5: Lâmpada fluorescente sobre um régua de 20cm;
- Item 6: Frente da Tela de Vidro com PCI;
- Itens 7 e 8: PCI;
- Item 9: Parte posterior da tela de vidro;
- Item 10: Folhas difusoras;
- Item 11: Perspex;
- Item 12: Folha reflexiva;
- Item 13: Tampa posterior do monitor e PCI e
- Item 14: Parte posterior do monitor.



**Figura 32: Monitor Desmontado.**

Durante a desmontagem do monitor mostrado na Figura 32, foi realizada a pesagem dos seus componentes. A Tabela 9 mostra as massas encontradas.

**Tabela 9: Massa dos componentes presentes em um monitor.**

Componente	Massa (g)	%	Componente	Massa (g)	%
Monitor inteiro	2198	100	Tela de vidro	246	11,19
Borda plástica (item 1)	86	3,91	PCI tela (itens 7 e 8)	24	1,1
Borda metálica (item 3)	30	1,36	Folhas difusoras, Perspex e folhas reflexivas	220	10
Peças metálicas (item 3)	42	1,91	PCI monitor (item 13)	186	8,46
Peça plástica (item 4)	26	1,2	Parte posterior do monitor (item 14)	1314	59,78
Suportes e lâmpadas fluorescentes (item 5)	8	0,36	Parafusos	6	0,28

As principais diferenças encontradas na estrutura estão entre o número de placas de circuito impresso, no número de folhas difusoras e a presença de chapas de aço, presentes em algumas marcas, entre a tela de LCD e as PCI. A diferença de peso encontrada para monitores e telas com mesmo tamanho de tela deve-se, principalmente a presença das chapas de aço citadas anteriormente e da base de alguns monitores que podem representar 30% do peso do mesmo.

### **5.1.1 Caracterização das Carcaças Poliméricas Externas**

Os constituintes poliméricos presentes nas carcaças, do monitor e da tela, são termoplásticos e possuem identificação na própria peça. A tampa da frente e a tampa de trás dos monitores são uma mistura de Policarbonato (PC), Copolímero Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), Poli(metacrilato de metila) (PMMA) e retardantes de chama livres de halogênios. A borda é feita apenas de PC.

### 5.1.2 Caracterização das Telas de LCD

As telas de LCD são usualmente constituídas das seguintes partes:

- Uma estrutura metálica,
- Borda plástica,
- Folhas difusoras,
- Folha Perspex,
- Folha reflexiva
- Lâmpadas fluorescentes,
- PCI e
- Camadas de vidro com cristal líquido, polarizadores, camada TFT e filtro de cor.

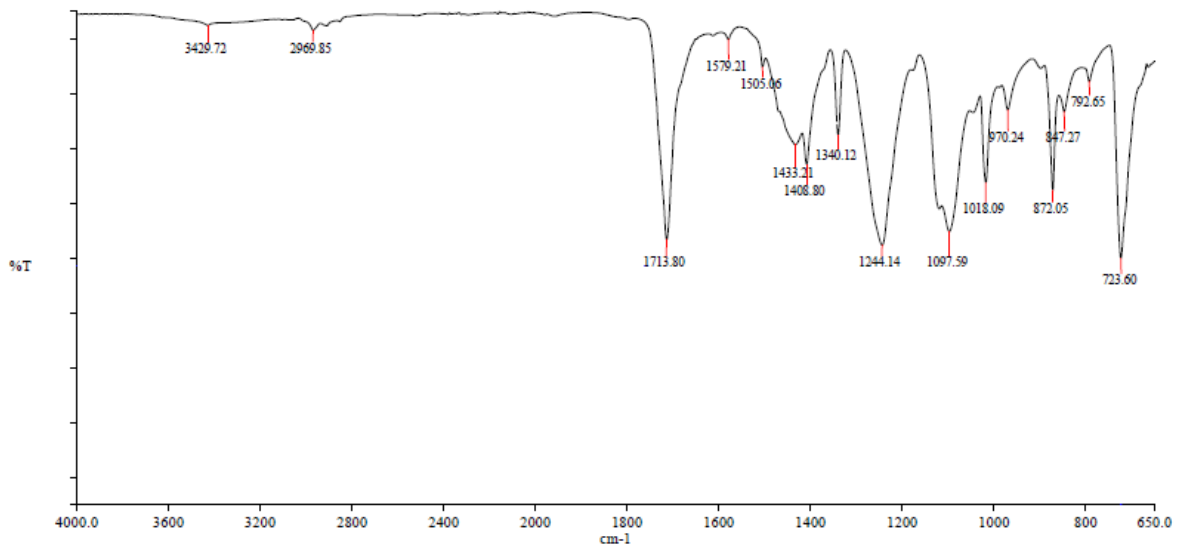
As lâmpadas fluorescentes não foram caracterizadas e a caracterização das PCIs está apresentada no capítulo seguinte.

As folhas difusoras, reflexivas e perspex (itens 10, 11 e 12 da Figura 32) foram caracterizadas via FTIR, sendo que os espectros encontrados possuíam variações conforme modelo e fabricante da tela. Porém, a Tabela 10 apresenta os principais tipos de polímeros encontrados nestes componentes. A folha difusora 1 está situada imediatamente após a tela de vidro e a folha difusora 2 está localizada entre as folhas 1 e 3. Com o objetivo de determinar se o material que compõe as folhas presentes na tela de LCD é o mesmo, a análise de FTIR foi realizado com 5 amostras de diferentes telas.

**Tabela 10: Resultado das análises de FTIR nas camadas poliméricas internas dos monitores.**

Componente	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
Folha Reflexiva	Acrílico	Politereftalato de etileno (PET)	PET	PET	Acrílico
Perspex	Acrílico	PC	Acrílico	Acrílico	Acrílico
Folha Difusora 3	Acrílico	Acrílico	Poliéster	Acrílico	Poliéster
Folha Difusora 2	Poliéster	Acrílico	Acrílico	Poliéster	Poliéster
Folha Difusora 1	Acrílico	Acrílico	Acrílico	Acrílico	Poliéster

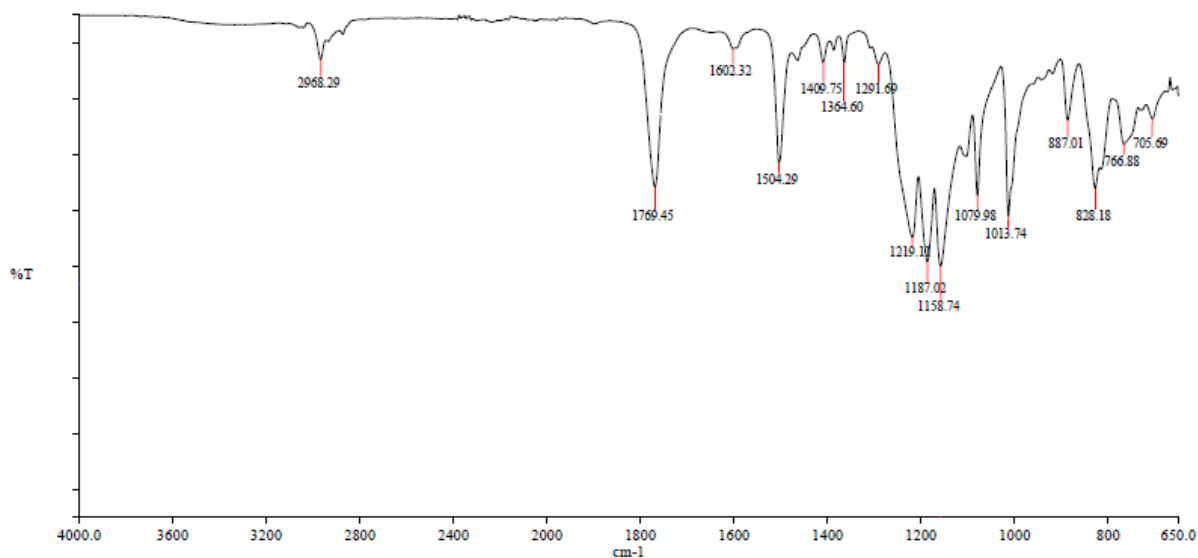
As figuras abaixo mostram os espectros do PET, PC e do poli(metacrilato de metila).



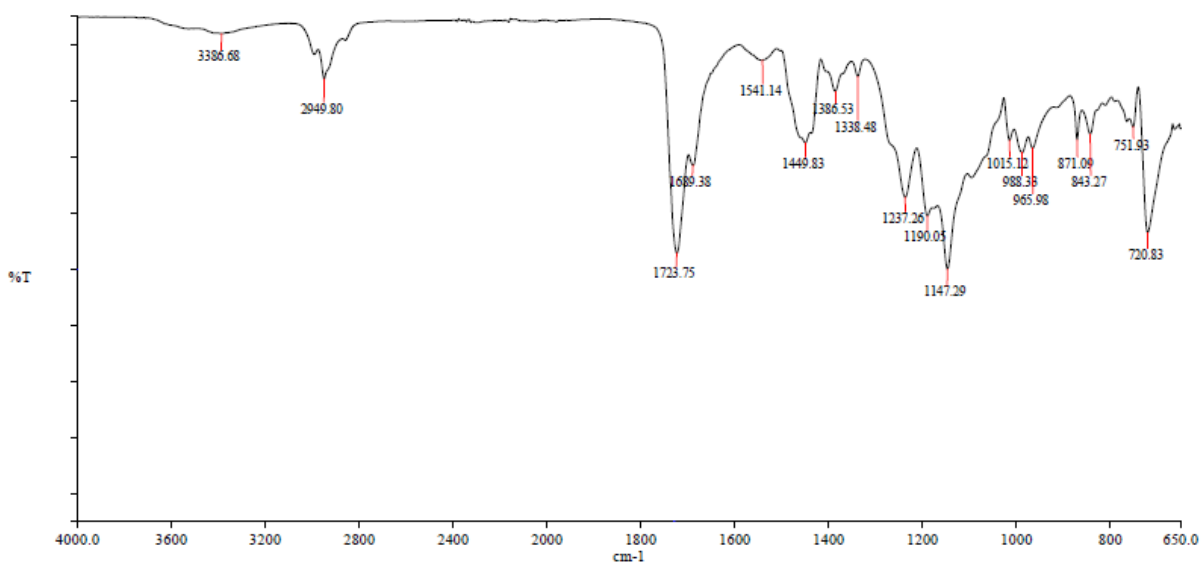
**Figura 33: Espectro do PET de uma folha reflexiva.**

A banda relacionada à vibração de estiramento da ligação C=O do éster de alcenoato é observada próxima a  $1714\text{ cm}^{-1}$ , enquanto que bandas relacionadas às vibrações do C–O–C, ligado ao grupamento éster, aparecem na região entre  $1270$  e  $1080\text{ cm}^{-1}$ . No PET o –CH<sub>2</sub>–CH<sub>2</sub>, unidade resultante do etileno-glicol, pode ser observado nas bandas em  $1433$ ,  $1340$  e  $847\text{ cm}^{-1}$  e a substituição para do anel aromático, na banda a  $723\text{ cm}^{-1}$ .

No espectro da Figura 34 observam-se alguns picos característicos do policarbonato como o da carbonila, próximo a  $1770\text{ cm}^{-1}$ , os três picos intensos entre  $1150$  e  $1250\text{ cm}^{-1}$  e o pico a  $1013\text{ cm}^{-1}$  da ligação C–O, além da metila em  $2968\text{ cm}^{-1}$  <sup>(96)</sup>.



**Figura 34: Espectro do PC de um perspex.**



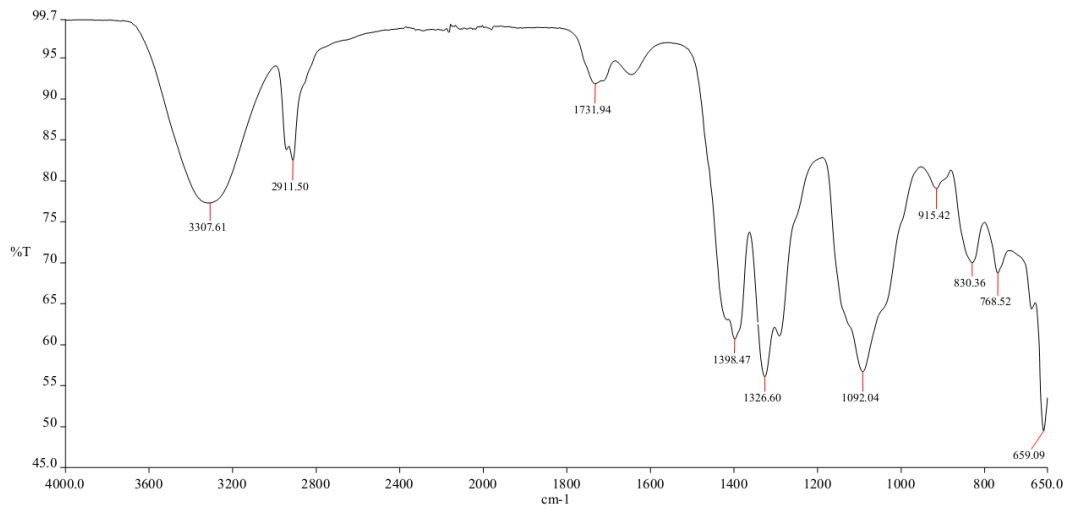
**Figura 35: Espectro do poli(metacrilato de metila) de uma folha difusora.**

No espectro da Figura 35 observam-se picos característicos do poli(metacrilato de metila), como a banda do estiramento C=O em  $1723\text{ cm}^{-1}$ , as quatro bandas intensas entre  $1300$  e  $1100\text{ cm}^{-1}$  devido ao estiramento C–O–C do grupamento éster do metacrilato, entre elas a banda em  $1147\text{ cm}^{-1}$  da ligação O–CH<sub>3</sub> <sup>(97)</sup>, as bandas entre  $3000$  e  $2800\text{ cm}^{-1}$ , relacionadas ao estiramento das ligações C–H de metilas e além outras observadas na região da impressão digital ( $1080 - 650\text{ cm}^{-1}$ ).

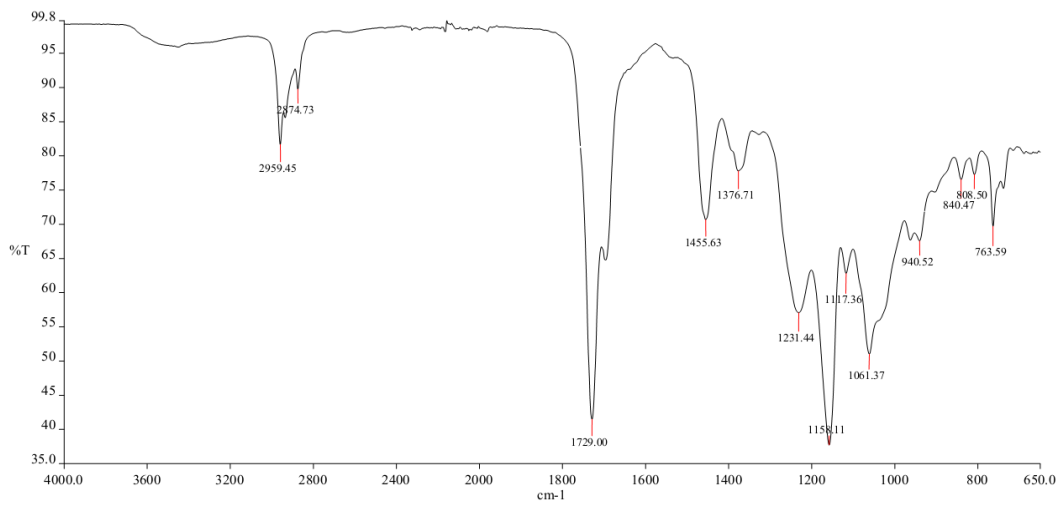
As películas poliméricas que foram separadas da Tela com acetona (Figura 21 e Figura 22) foram caracterizadas por FTIR, os resultados são mostrados na Tabela 11 e as imagens dos espectros são mostradas na Figura 36, Figura 37 e Figura 38.

**Tabela 11: Resultado das análises de FTIR para Películas Poliméricas.**

Estrutura	Material
Película polimérica (a)	Álcool polivinílico
Película polimérica (b)	Poli (acrilato de butila)
Película polimérica (c)	Éster celulósico

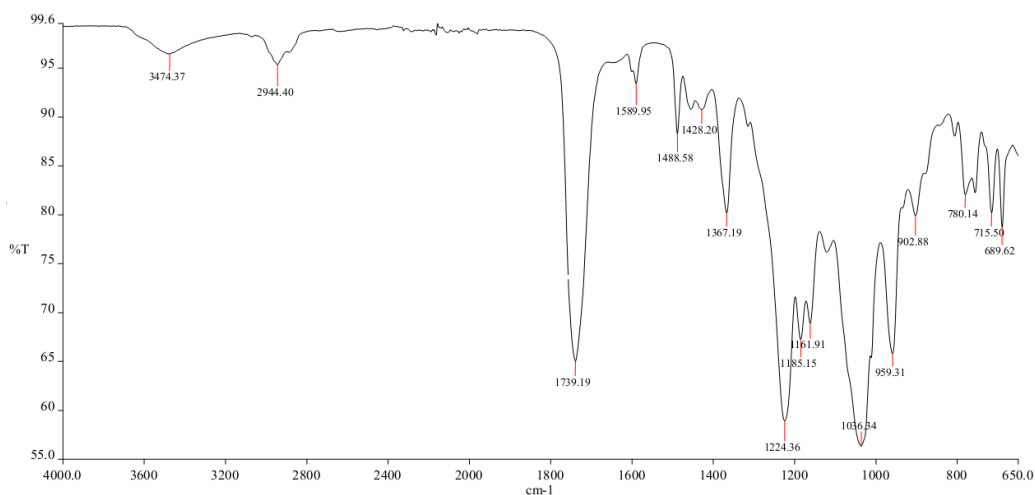


**Figura 36: Espectro da Película polimérica (a).**



**Figura 37: Espectro da Película Polimérica (b).**





**Figura 38: Espectro da Película polimérica (c)**

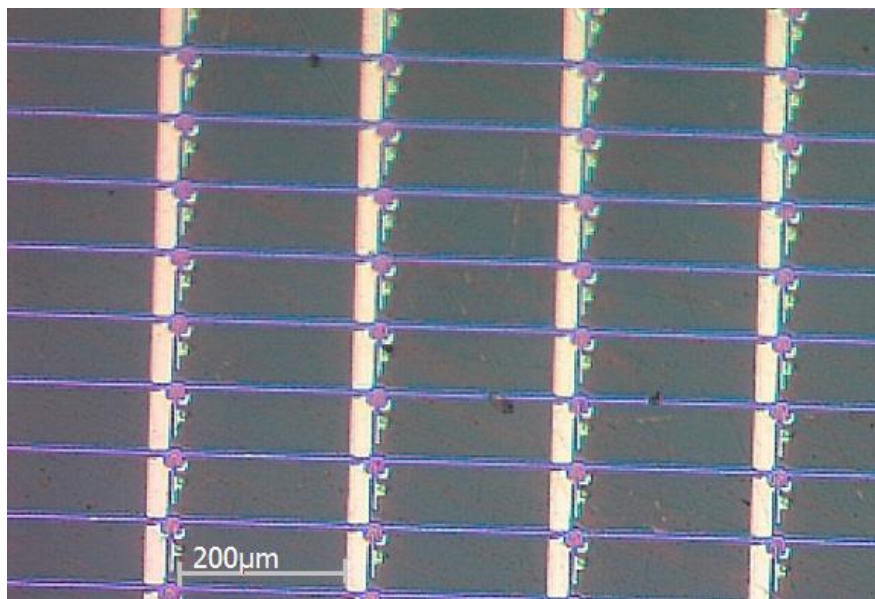
Como pode ser observado na Figura 36, o espectro do poli(álcool vinílico) apresenta bandas características da presença de hidroxila, como a vibração do estiramento do O–H encontrado como uma banda larga próxima a  $3300\text{ cm}^{-1}$  e o estiramento do C–O, como uma banda larga e intensa em  $1092\text{ cm}^{-1}$ . Do lado direito desta banda é observado um ombro a aproximadamente  $1050\text{ cm}^{-1}$  devido à ligação C–O do álcool primário e do lado esquerdo, um ombro que pode ser atribuído ao grau de cristalinidade do poli(álcool vinílico).

Algumas bandas características mostradas na Figura 37, são do estiramento C=O do éster em  $1729\text{ cm}^{-1}$ , um ombro próximo a  $1700\text{ cm}^{-1}$  característico de ácido carboxílico e duas bandas intensas entre  $1300$  e  $1100\text{ cm}^{-1}$  devido ao estiramento C–O–C do grupamento éster. A posição e o aspecto das bandas entre  $3000$  e  $2800\text{ cm}^{-1}$ , relacionadas ao estiramento das ligações C–H de metilas e metilenos, juntamente com aquelas observadas na região da impressão digital ( $1080 - 650\text{ cm}^{-1}$ ), confirmam que o polímero é poli(acrilato de butila).

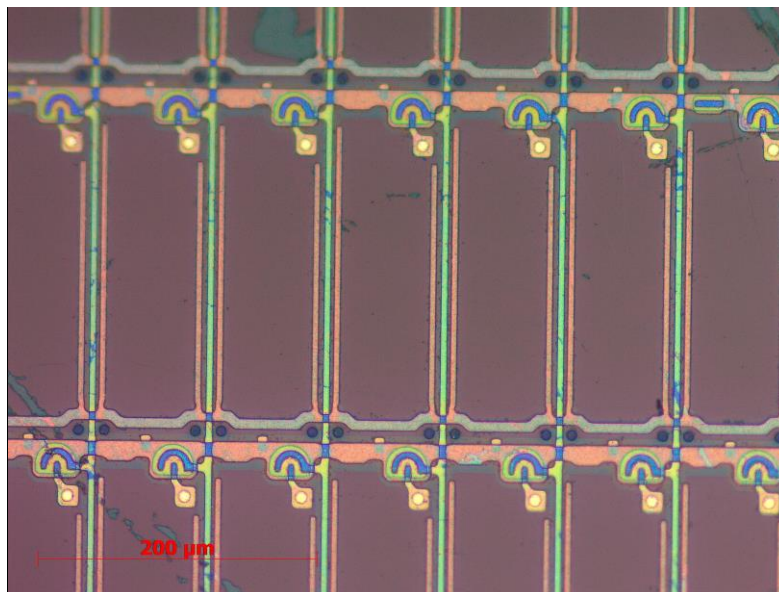
A Figura 38 mostra as bandas características do éster celulósico como a ligação C=O em  $1739\text{ cm}^{-1}$ , um pico de menor intensidade da hidroxila da celulose a aproximadamente  $3474\text{ cm}^{-1}$  e as bandas entre  $1200$  a  $1050\text{ cm}^{-1}$  devido ao estiramento assimétrico das pontes de hidrogênio, ao estiramento da ligação C=O e à flexão do anel da celulose.

Análises de Microscopia Óptica foram realizadas nas camadas de vidro (dianteira e posterior) com o objetivo de permitir uma melhor visualização das estruturas presentes (TFT e pixels). As imagens são mostradas nas figuras abaixo. A Figura 39 é uma ampliação de

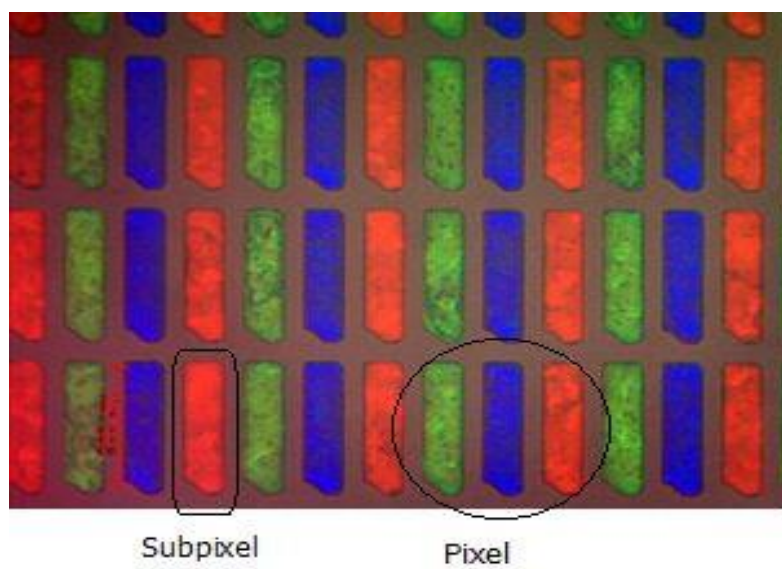
100x do vidro posterior, lado que fica em contato com cristal líquido, face interna, onde foi observada a TFT, sendo esta a película responsável pela passagem ou não da luz através da variação de tensão aplicada. A Figura 40 é uma ampliação de 200x da camada de vidro posterior, onde a camada TFT pode ser observada com maior nitidez. A Figura 41 é uma ampliação de 100x da camada de vidro dianteira, lado que fica em contato com as películas poliméricas, face externa, onde foi observado o conjunto de pixels que formam a imagem. Sendo que cada pixel é formado por três “subpixels”, verde, azul e vermelho <sup>(98)</sup> e a Figura 42 é uma ampliação de 100x da camada de vidro dianteira, lado que fica em contato com o cristal líquido. Cada divisão (subpixel) da tela é controlada por um minúsculo transistor localizado no vidro posterior. Cada transistor chama-se TFT.



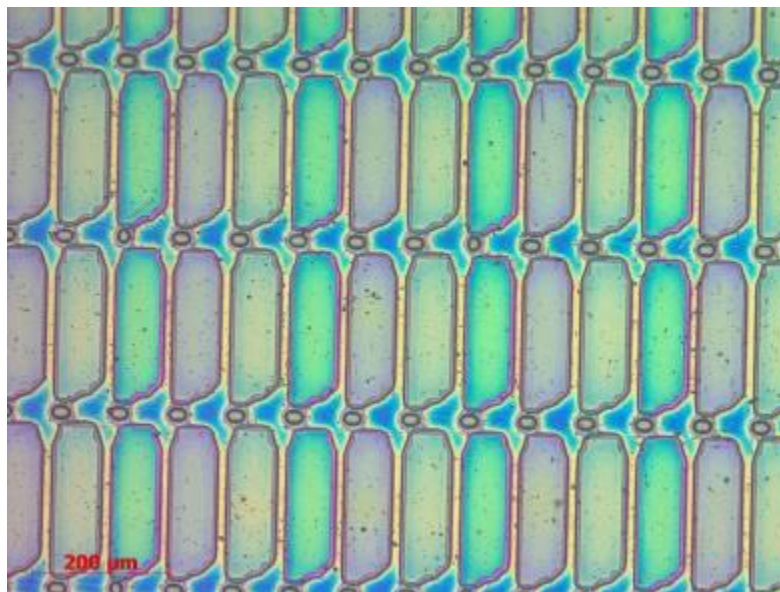
**Figura 39: Figura do Vidro Posterior de uma Tela de LCD - Camada TFT.**



**Figura 40: Figura do Vidro Posterior de uma Tela de LCD - Camada TFT em Detalhes.**

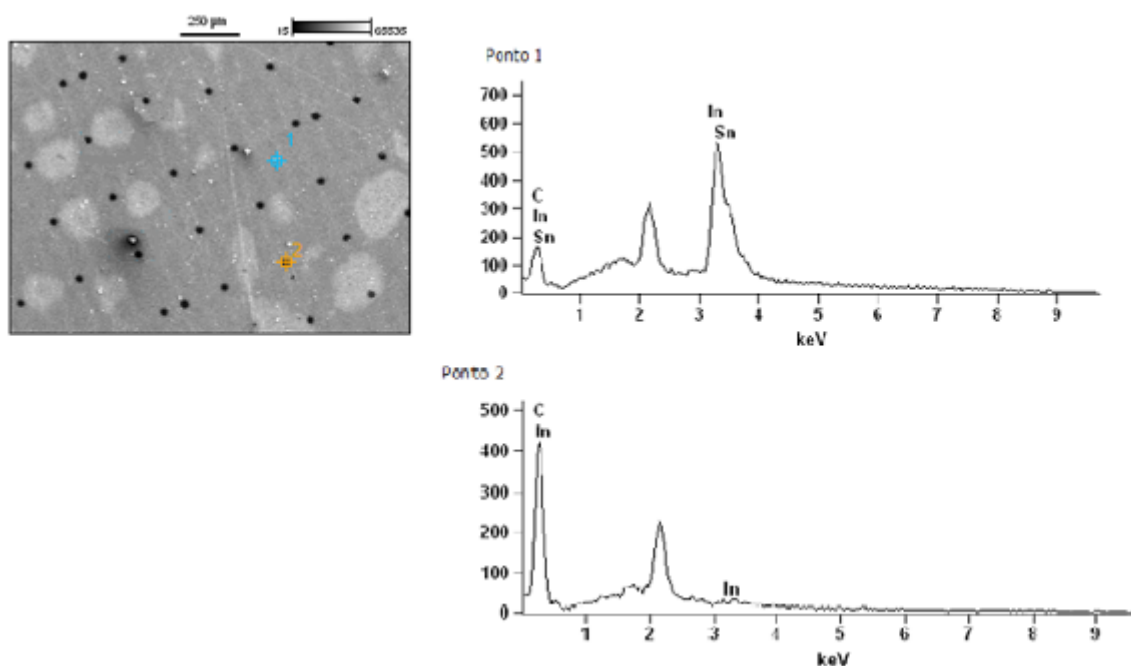


**Figura 41: Figura do Vidro Dianteiro de uma Tela de LCD Mostrando Pixels - lado em contato com o Filme Polimérico.**



**Figura 42: Figura do Vidro Dianteiro de uma Tela de LCD - lado em contato com o Cristal Líquido.**

As análises de MEV/EDS e Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX) foram realizadas nas camadas de vidro para confirmar a presença dos elementos índio e estanho, além do material que compõe a camada de TFT. A Figura 43 mostra a tela dianteira, confirmando a presença da camada de índio e estanho (ITO).



**Figura 43: MEV/EDS da tela de LCD - camada dianteira, face interna.**

A Figura 44 mostra a tela posterior, sendo uma a imagem detalhada da TFT e a outra imagem, uma ampliação. O ponto 3 mostra que os circuitos onde a tensão passa são feitos de cobre.

Tabela 12 mostra os resultados de FRX, realizados nas telas dianteira e posterior onde se observa supostamente a presença de índio e estanho na forma de dois óxidos diferentes, embora na tela de LCD esteja presente o óxido de índio dopado com óxido de estanho que dá origem a um material condutor elétrico transparente que conduz eletricidade para o cristal líquido, além de outros constituintes mais comuns de serem encontrados em vidros como a sílica, o óxido de cálcio e o óxido de alumínio presentes no vidro soda-cal.

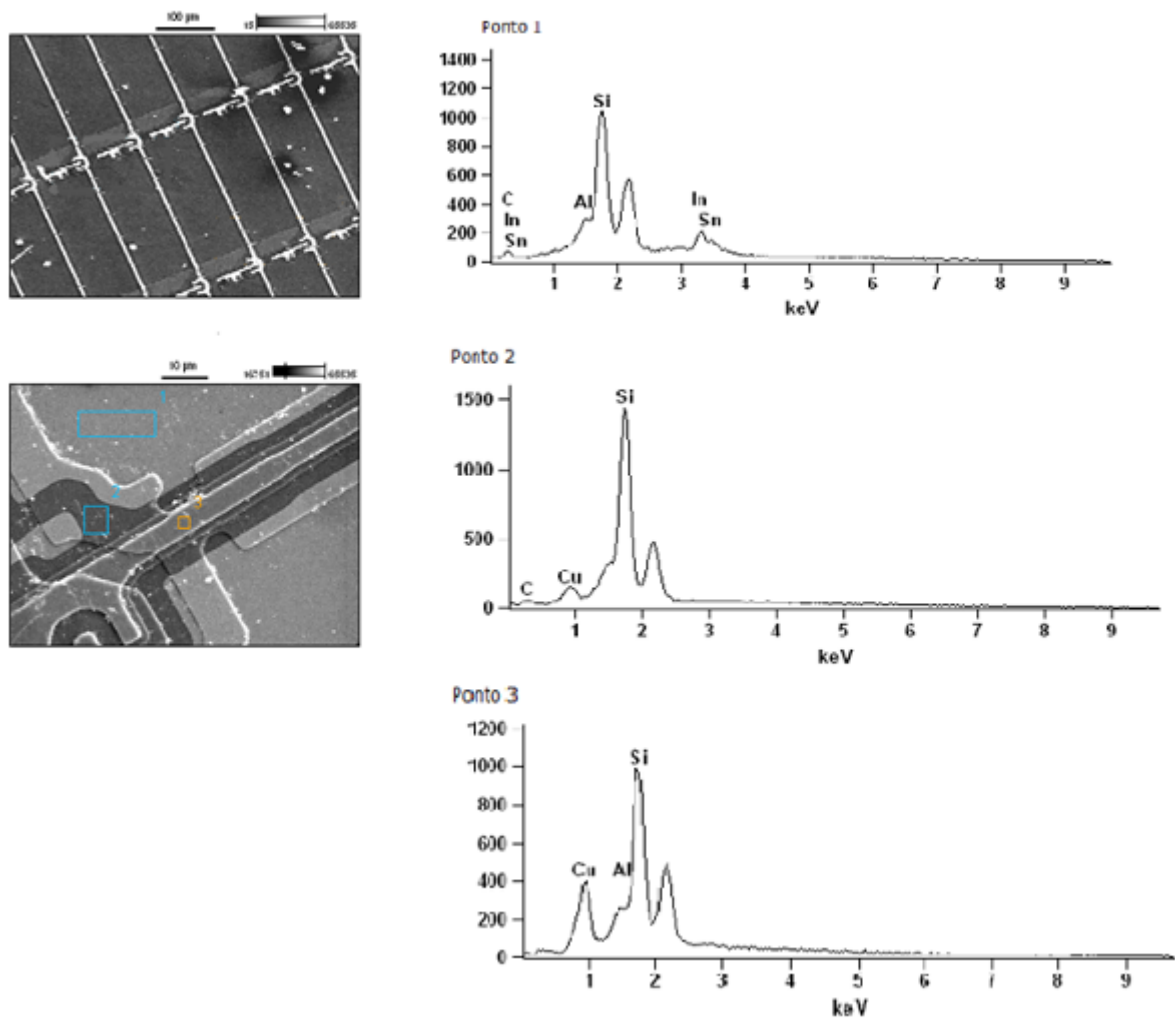


Figura 44: MEV/EDS da tela de LCD - camada posterior face interna.

**Tabela 12: Resultados da FRX para Óxidos encontrados na Tela de Vidro.**

Óxido (%)	Tela Dianteira	Tela Posterior	Óxido (%)	Tela Dianteira	Tela Posterior
SiO <sub>2</sub>	57,72	63,85	SO <sub>3</sub>	0,25	-
CaO	18,08	6,75	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,13	6,37
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,03	9,27	CuO	0,08	0,06
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,17	2,53	NiO	0,04	8,21
SrO	3,43	1,90	Rb <sub>2</sub> O	0,02	-
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,13	0,02	MoO <sub>3</sub>	-	0,07
SnO <sub>2</sub>	1,77	0,77	MnO	-	0,06
Cl	0,82	-	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0,06
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,29	-	Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0,05

### 5.1.3 Caracterização das Placas de Circuito Impresso

Os resultados das lixiviações realizadas com amostras com granulometria  $\leq 1,00 > 0,25$ mm podem ser visualizados na Tabela 13, sendo que o percentual total de metais das amostras, obtido por diferença de peso, é de 46% e o encontrado na análise por Absorção Atômica por Chama é de 35%. Esta diferença deve-se principalmente a presença de metais que não foram quantificados e à parte da fração não metálica que foi lixiviada juntamente com os metais. A terceira coluna “massa” refere-se a quantidade de determinado metal em relação a uma PCI de LCD com 22g, que é o peso médio da mesma.

**Tabela 13: Metais Presentes em PCI de LCD com granulometria -1,00+0,25mm.**

Elemento	%	Massa (g)
Alumínio	3,39	0,7346
Cobre	23,70	5,2123
Chumbo	0,46	0,1022
Ferro	5,20	1,1445
Níquel	0,88	0,1948
Ouro	0,01	0,0021
Prata	0,57	0,1266
Zinco	0,96	0,2122

Os resultados das lixiviações realizadas com amostras com granulometria  $< 0,25$ mm podem ser visualizados na Tabela 14, sendo: (A) amostra lixiviada com água régia, (B) amostra lixiviada com água régia resultante do processo de cominuição da amostra com

granulometria  $\leq 1,00 > 0,25\text{mm}$  e a amostra (C) foi lixiviada com ácido nítrico resultante do processo de cominuição da amostra com granulometria  $\leq 1,00 > 0,25\text{mm}$ . A partir dos resultados da Tabela 14 observa-se que não há diferenças significativas na quantificação de prata utilizando como agente lixiviante água régia ou ácido nítrico, o mesmo não ocorre com o ouro uma vez que foram encontradas quantidades maiores na amostra lixiviada com ácido nítrico, o que não era esperado, pois este agente lixiviante não é capaz de atacar ouro sem a presença de ácido clorídrico.

Comparando as Tabelas 13 e 14 fica evidente que o cobre fica preferencialmente concentrado em frações com granulometrias maiores.

**Tabela 14: Metais Presentes em PCI de LCD com granulometria  $< 0,25\text{mm}$ .**

Elemento	Amostra (A)	Amostra (B)	Amostra (C)
Alumínio	2,24%	3,83%	2,44%
Cobre	12,28%	9,79%	11,17%
Chumbo	0,42%	0,65%	0,41%
Ferro	4,92%	4,79%	2,41%
Níquel	0,77%	0,22%	0,25%
Ouro	0,01%	0,01%	0,21%
Prata	0,09%	0,25%	0,20%
Zinco	0,40%	0,44%	0,17%

#### 5.1.4 Caracterização da Periculosidade dos Resíduos

Após a caracterização dos materiais, foram realizados ensaios de classificação de resíduos sólidos através das normas brasileiras. Este tipo de ensaio é importante para definir a melhor forma de disposição do resíduo, sem contaminação ambiental, caso ele não seja enviado para reciclagem.

A tela de vidro e a PCI presentes na tela de LCD foram submetidas aos ensaios de lixiviação descritos na norma NBR 10005. A Tabela 15 mostra os resultados obtidos a partir de cromatografia iônica e ICP-AES.

**Tabela 15: Resultado da análise do material lixiviado de acordo com a NBR 10005.**

Parâmetro	Tela Vidro	PCI	Limite NBR 10004
Fluoreto (mg/L)	287,01	*	150
Cádmio (mg/L)	*	<0,002	0,5
Cromo (mg/L)	*	0,01	5,0
Chumbo (mg/L)	*	0,63	1,0
Mercúrio (µg/L)	*	<0,2	100

\* - parâmetro não determinado.

Na análise de cromatografia iônica, diversos íons foram quantificados, mas o anexo F da norma NBR 10004 para o extrato obtido no ensaio de lixiviação, cita apenas o Fluoreto como parâmetro presente nas telas, sendo que o limite de 150 mg/L foi ultrapassado. Desta forma as telas de LCD devem ser classificadas como resíduo Classe I – perigosos. Isto significa que estas telas, caso não sejam recicladas, devem ser dispostas em locais apropriados para resíduos industriais perigosos, sem contato com o meio ambiente.

O fluoreto encontrado no extrato lixiviado das telas é em função principalmente da presença do cristal líquido que pode ter entre os seus componentes o difluorofenileno<sup>(99)</sup>.

As placas podem ser classificadas como classe II – não perigosa, pois nenhum dos elementos analisados ultrapassou o limite da norma. Porém, a norma brasileira divide os resíduos da classe II em A (não inertes) e B (inertes). A fim de definir esta subdivisão, foram realizados ensaios de solubilização de acordo com a norma NBR 10006. A Tabela 16 mostra os resultados obtidos por ICP-AES.

**Tabela 16: Resultado da análise de ICP-AES do ensaio de solubilização.**

Elemento	Amostra	NBR 10004	Elemento	Amostra	NBR 10004
Alumínio (mg/L)	< 0,080	0,2	Ferro (mg/L)	< 0,04	0,3
Cádmio (mg/L)	<0,002	0,005	Mercúrio (µg /L)	< 0,02	1,0
Chumbo (mg/L)	0,10	0,01	Prata (mg/L)	< 0,01	0,05
Cobre (mg/L)	2,10	2,0	Sódio (mg/L)	1,90	200,0
Cromo (mg/L)	< 0,004	0,05	Zinco (mg/L)	0,32	5,0

Os resultados obtidos no ensaio de solubilização classificam as placas como Classe II A – não inerte, pois os teores de chumbo e cobre ficaram acima do limite. Resíduos



com esta classificação apresentam propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água e desta forma, caso não sejam reciclados, devem ser dispostos em locais próprios para este tipo de resíduo, sem contato com o meio ambiente.

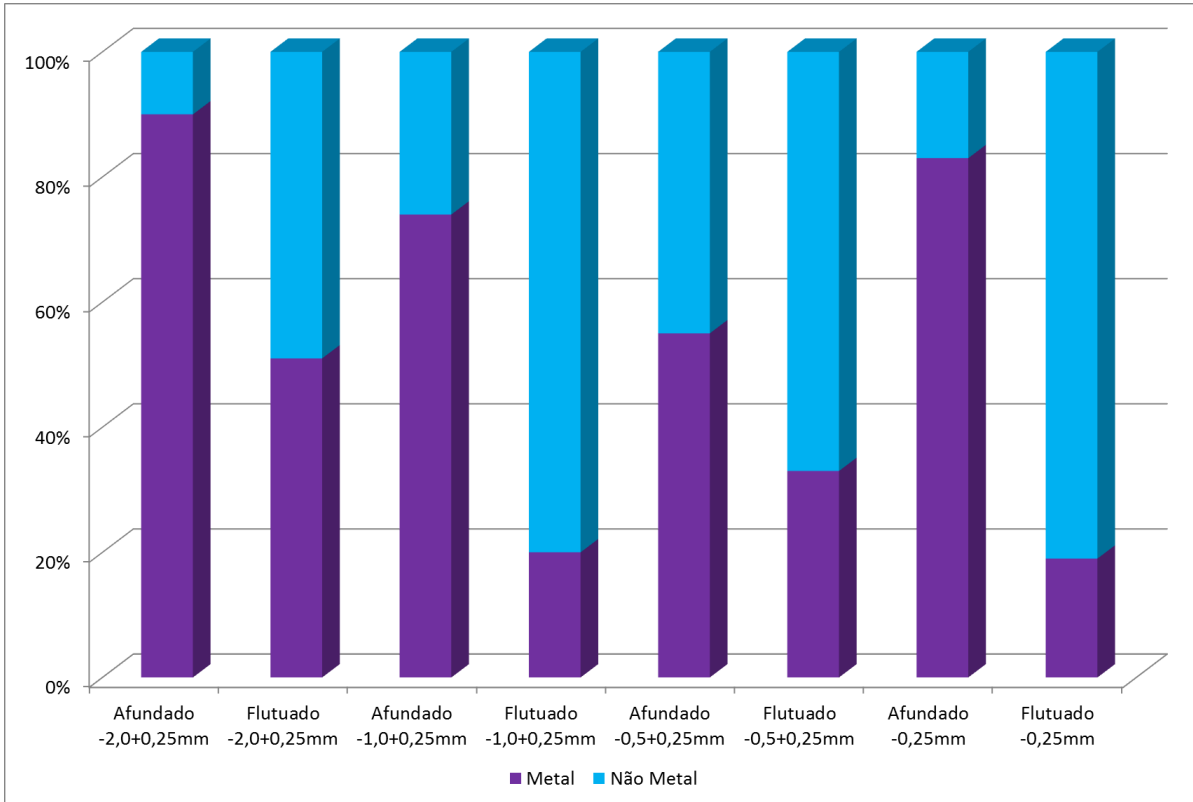
## **5.2 Processamento Mecânico das Placas de Circuito Impresso**

Após a caracterização das PCIs, estas foram cominuídas e classificadas em diversas granulometrias para a realização dos ensaios em meio denso e do concentrador Mozley.

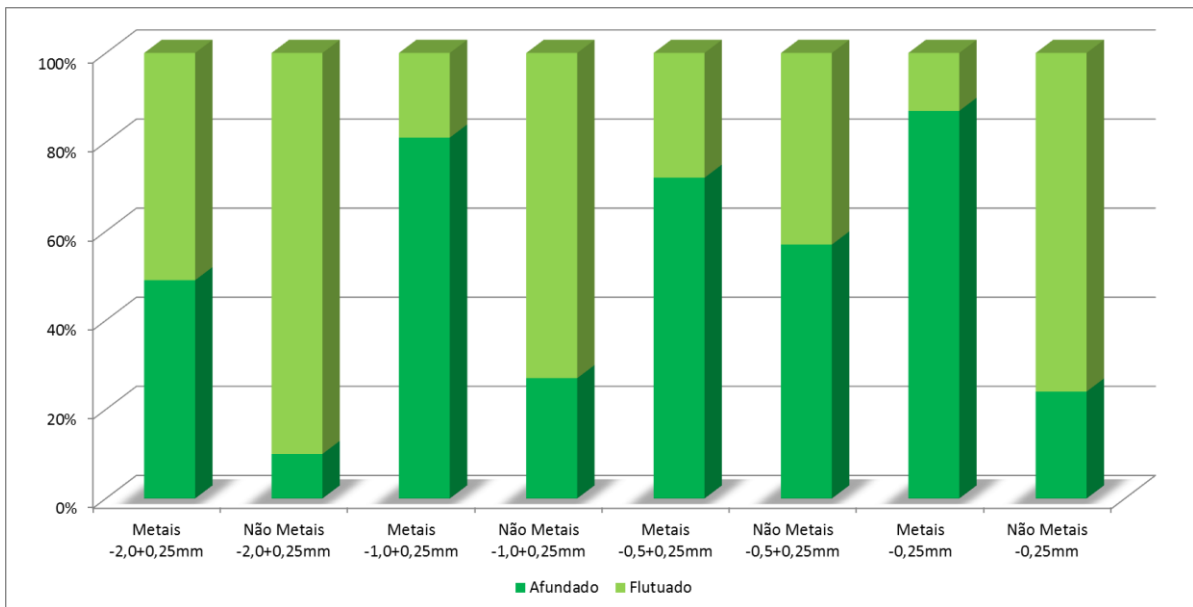
### **5.2.1 Meio Denso**

Os ensaios em meio denso foram realizados com o propósito de determinar o grau de liberação do material e avaliar a eficiência do processo de cominuição e classificação. Neste ensaio, foram utilizadas apenas PCI genéricas. Os resultados dos ensaios realizados podem ser observados na Figura 45. A granulometria -2 +1 mm apresenta um teor de apenas 10% de material não metálico na fração afundada, ou seja, há um alto teor de metais nesta fração, porém, conforme a Figura 46 menos de 50% dos metais ficou nesta fração, o que resulta numa elevada perda de metais. Este comportamento, provavelmente está associado com um baixo grau de liberação nesta fração, ou seja, os metais ainda encontram-se ligados/conectados/encapsulados por polímeros e/ou cerâmicos.

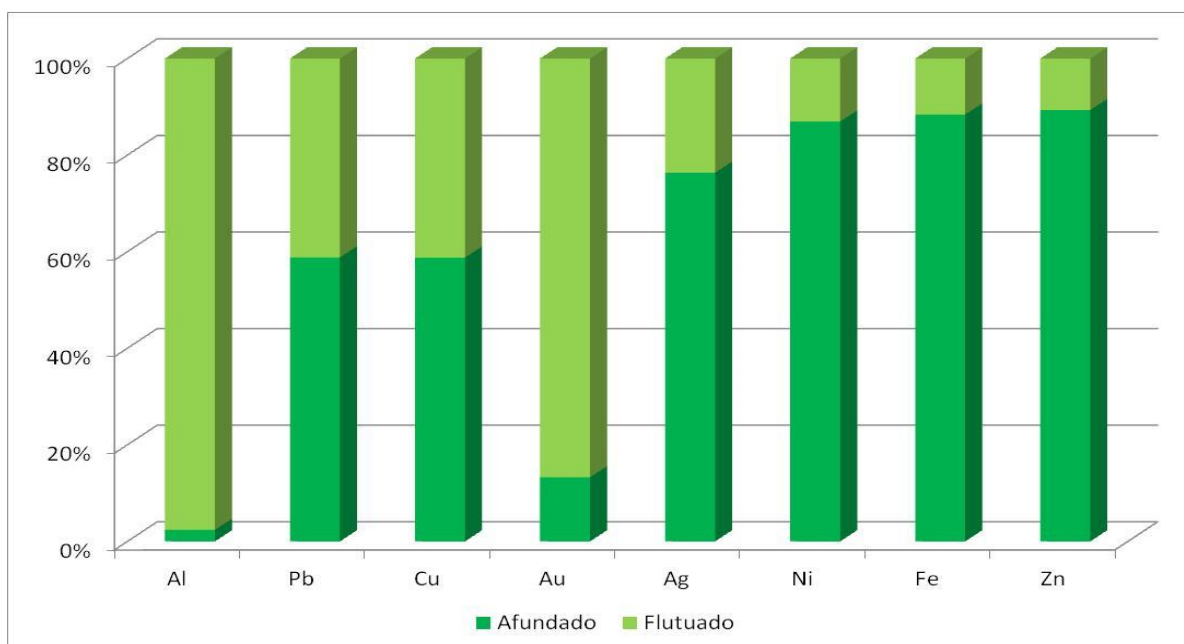
A fração que apresentou a melhor separação foi a menor que 0,25mm, mas para chegar a esta granulometria há muita perda de material durante o processo de cominuição. Desta forma, optou-se por usar nas etapas seguintes a granulometria -1 +0,25 mm onde há menos perdas associadas ao processo de cominuição e há recuperação de mais de 80% da fração metálica, demonstrando um alto grau de liberação nesta fração.



**Figura 45: Distribuição das Frações Metálicas e Não Metálicas no Ensaio em Meio Denso.**



**Figura 46: Distribuição dos Metais nas Frações Afundado e Flutuado.**



**Figura 47: Distribuição dos Metais no Ensaio de Meio Denso.**

Com o objetivo de verificar quais os metais ficaram concentrados nas frações afundado e flutuado, estas foram lixiviadas com água régia e analisadas por ICP-AES. A Figura 47 mostra a distribuição dos metais para a granulometria -1 +0,25mm uma vez que esta foi escolhida para usar no concentrador Mozley. Neste gráfico é considerado 100% a fração total do metal na amostra lixiviada e analisada.

A partir da Figura 47, é possível observar que houve a separação dos metais no ensaio de meio denso, onde o alumínio que tem densidade de  $2,7\text{g/cm}^3$  ficou concentrado na fração do flutuado e os demais metais ficaram na fração do afundado em teores acima de 50%, com exceção do ouro. Este comportamento do ouro pode ser explicado pela condição geométrica em que ele é encontrado nas PCIs. Normalmente, o ouro é utilizado na forma lamelar, como um revestimento muito fino sobre outros metais. Após a moagem, está lâmina de ouro, já separada do seu substrato, tem dificuldade de afundar, mesmo tendo uma densidade maior que o líquido <sup>(44)</sup>, o que faz com que este fique concentrado na fração de Flutuados.

### 5.2.2 Concentrador Mozley

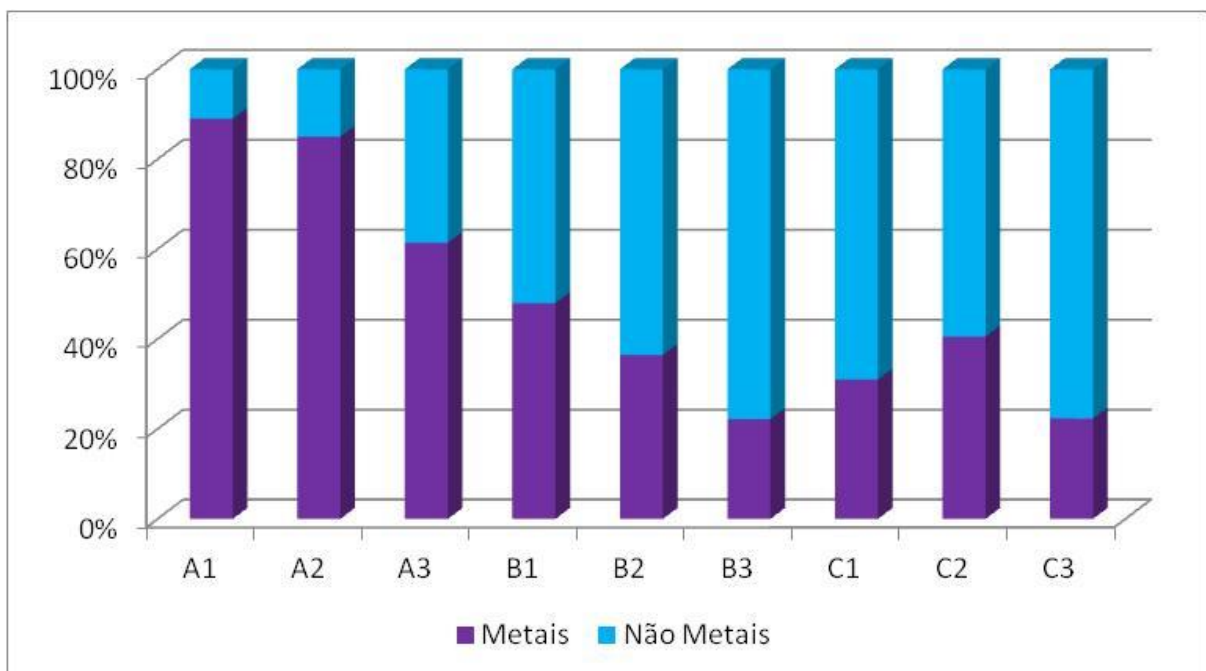
Para a realização dos ensaios no concentrador Mozley, optou-se por usar a granulometria -1 +0,25mm, pois granulometrias menores que 0,25mm podem interferir na eficiência do processo <sup>(88)</sup>, além dos problemas já citados anteriormente, quanto a perda de

material na etapa de cominuição. Também optou-se por não usar material acima de 1 mm, pois como demonstrado na Figura 46, o teor de metal na fração afundada ficou abaixo de 50%.

As frações obtidas no concentrador Mozley são divididas entre Concentrados, Mistos e Leves. Sendo:

- Concentrado: a fração mais densa que fica presa à mesa, rica em metais;
- Mista: composta tanto de metais quanto de não metais e
- Leve: composta principalmente de não metais.

Como pode ser observado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, o primeiro ensaio foi realizado em triplicata, de acordo com o fluxograma da Figura 29, foram obtidos os resultados esperados, uma vez que a fração Concentrada é rica em metais e a fração Leve é rica em não metais.

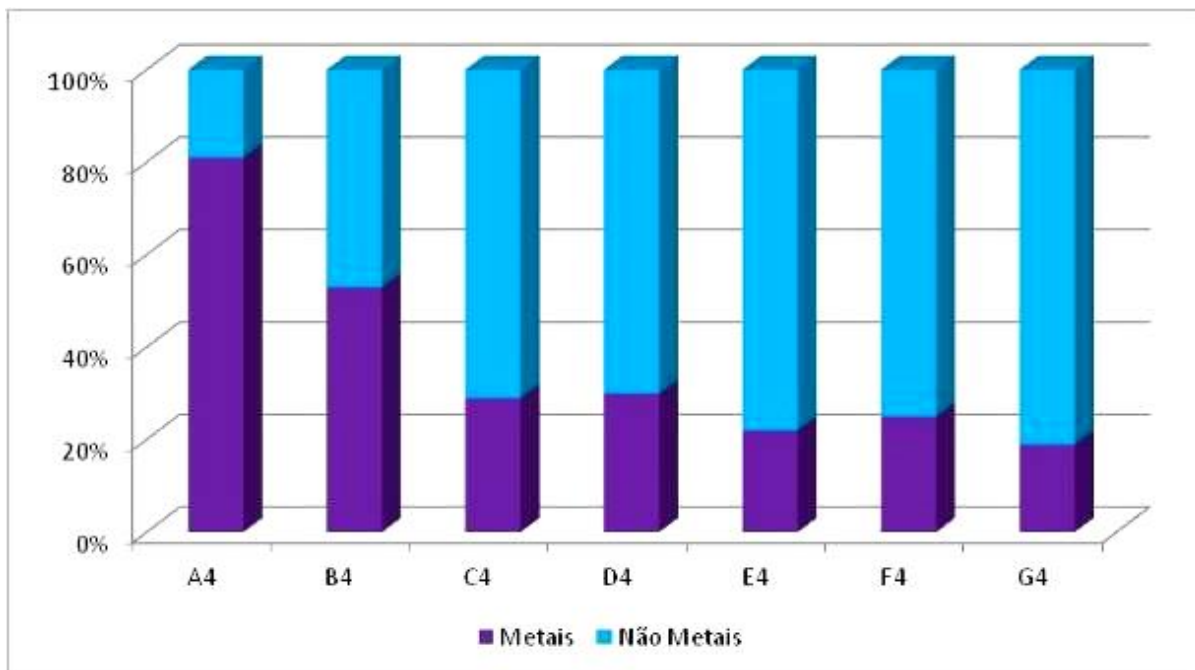


**Figura 48: Ensaio Preliminares Realizados no Concentrador Mozley com 3 amostras distintas, onde A é a fração concentrada, B é a fração mista e C é a fração leve.**

De acordo com a Figura 48, ainda há quantidades significativas de metais nas frações Mistos e Leves. Desta forma, foi realizado um novo ensaio, com a amostra número 4, seguindo o fluxograma da Figura 30 (rota 2), onde as frações Mistas e Leves retornaram a

mesa de Mozley para uma nova separação, obtendo-se 7 frações finais (A, B, C, D, E, F e G). Na Figura 49 e na Tabela 17 observam-se os resultados obtidos.

A maioria dos metais ficou concentrada nas frações Concentrados (A4) e Mistos (B4, C4 e D4). Desta forma, uma nova separação da fração de Leves em 3 novas frações (E4, F4 e G4), conforme o fluxograma não mostrou-se interessante. O ouro por sua vez, ficou principalmente nas frações E4, F4 e G4 em função da sua forma lamelar.



**Figura 49: Resultados do Teor de Metais e Não Metais no Ensaio no Concentrador Mozley da Amostra 4.**

**Tabela 17: Recuperação (%) de Metais da Amostra 4 em cada uma das Frações.**

Fração	Al (%)	Pb (%)	Cu (%)	Fe (%)	Ni (%)	Au (%)	Ag (%)	Zn (%)
A4	1,92	13,5	30,9	51,6	32,1	6,99	44,9	67,5
B4	12,4	11,8	23,4	23,3	16,3	13,0	24,8	20,1
C4	14,8	65,3	8,24	9,93	41,1	7,06	11,8	4,90
D4	17,3	6,22	12,7	8,60	6,64	13,1	9,72	4,90
E4	13,9	1,26	7,02	2,81	1,24	12,0	2,25	0,94
F4	19,3	1,42	10,1	2,23	1,35	22,7	3,07	0,87
G4	20,3	0,46	7,63	1,49	1,27	25,1	3,52	0,71

A partir dos resultados acima, um novo fluxograma (rota 3) foi proposto, conforme a Figura 31. Com este fluxograma foram realizados três novos ensaios (amostras 5, 6 e 7). Os resultados estão apresentados na Tabela 18 e na Tabela 19.

**Tabela 18: Resultados dos Ensaio no Concentrador Mozley para as amostras 5, 6 e 7.**

Amostra 5			Amostra 6			Amostra 7		
Fração	Metal	Não Metal	Fração	Metal	Não Metal	Fração	Metal	Não Metal
A5	77%	23%	A6	76%	24%	A7	78%	22%
B5	74%	26%	B6	60%	40%	B7	76%	24%
C5	43%	57%	C6	38%	62%	C7	44%	56%
D5	18%	82%	D6	17%	83%	D7	16%	84%
E5	18%	82%	E6	18%	82%	E7	16%	84%

A Tabela 18 mostra que as frações de interesse A e B ficaram concentradas em metais e a fração C embora tenha menos de 50% de metais presente possui quantidades interessantes de metais, portanto não foi considerada como rejeito.

**Tabela 19: Distribuição de Metais e Não Metais em cada uma das Frações.**

Amostra/ Fração	METAIS			NÃO METAIS		
	5	6	7	5	6	7
A	48%	65%	60%	11%	18%	12%
B	10%	13%	2%	3%	8%	0%
C	25%	7%	20%	27%	10%	18%
D	11%	3%	5%	39%	14%	20%
E	6%	12%	13%	20%	50%	49%

Na Tabela 19, é possível observar a quantidade de metais e de não metais que ficou em cada fração. Na amostra 5, 48% dos metais e 11% dos não metais desta amostra ficaram retidos na fração A, assim como na amostra 6, 65% dos metais e 18% dos não metais ficaram retidos na fração A. Desta forma, observa-se que é possível recuperar 83% (A+B+C), 85% e 82% de metais das amostras 5, 6 e 7 respectivamente.

Nas amostras 5 e 6 foi realizada análise química por Espectroscopia de Absorção Atômica com o objetivo de definir se determinados metais ficam distribuídos em frações preferenciais. Os resultados podem ser observados na Tabela 20.

Na Tabela 20, pode-se observar que os resultados obtidos no concentrador Mozley são similares aos observados na Figura 47 (ensaio em meio denso). O alumínio (devido a densidade) e o ouro (devido a forma lamelar) concentram-se preferencialmente na fração de “Leves”. No entanto é possível recuperar teores maiores que 80% de cobre e maiores que 90% de chumbo, ferro, níquel, prata e zinco. Dentre as amostras analisadas foi possível observar que embora a recuperação de ouro seja maior na amostra 5, os demais metais são

recuperados em maior quantidade na amostra 6, o que faz do uso de menor inclinação da bandeja a melhor opção.

A partir dos resultados obtidos com o concentrador Mozley para as placas genéricas, especialmente para as amostras 5 e 6, foram realizados 8 novos ensaios, com PCI provenientes de LCD. A Tabela 21 mostra os resultados obtidos, onde na coluna “Ensaio” são mostrados o número da amostra, a massa final e o quanto esta representa em relação a massa inicial; o percentual de metais e de não metais na amostra. A coluna “Frações Obtidas” refere-se às frações conforme o fluxograma da Figura 31. A coluna “Amostra – Metais” mostra quanto do teor total de metais ficou retida na fração e a coluna “Fração – Metais” mostra o quanto daquela fração é de metais.

**Tabela 20: Distribuição de Metais das Amostras 5 e 6 em cada uma das Frações.**

<b>Amostra 5</b>	<b>Al (%)</b>	<b>Pb (%)</b>	<b>Cu (%)</b>	<b>Fe (%)</b>	<b>Ni (%)</b>	<b>Au (%)</b>	<b>Ag (%)</b>	<b>Zn (%)</b>
<b>A</b>	7%	61%	44%	69%	70%	27%	52%	72%
<b>B</b>	1%	9%	9%	14%	12%	4%	12%	12%
<b>C</b>	33%	27%	30%	8%	12%	25%	29%	13%
<b>D</b>	47%	2%	11%	6%	4%	34%	4%	2%
<b>E</b>	12%	1%	5%	3%	2%	10%	3%	1%
<b>A+B+C</b>	41%	97%	84%	91%	94%	56%	93%	98%
<b>D+E</b>	59%	3%	16%	9%	6%	44%	7%	2%
<b>Amostra 6</b>	<b>Al (%)</b>	<b>Pb (%)</b>	<b>Cu (%)</b>	<b>Fe (%)</b>	<b>Ni (%)</b>	<b>Au (%)</b>	<b>Ag (%)</b>	<b>Zn (%)</b>
<b>A</b>	14%	78%	61%	82%	79%	25%	71%	90%
<b>B</b>	5%	16%	13%	12%	12%	5%	20%	8%
<b>C</b>	15%	3%	11%	2%	5%	10%	7%	1%
<b>D</b>	18%	0,50%	3%	1%	1%	21%	0,30%	0,20%
<b>E</b>	48%	2%	12%	4%	3%	40%	2%	1%
<b>A+B+C</b>	34%	98%	85%	95%	96%	39%	98%	99%
<b>D+E</b>	66%	2%	15%	5%	4%	61%	2%	1%

A partir dos resultados mostrados na Tabela 21, é possível observar que o teor de metais nas amostras varia entre 40 e 45%, no entanto o teor de rejeitos (frações D e E) varia bastante entre as amostras mesmo com configurações distintas entre estas. A melhor configuração seria aquela que apresenta nas frações D e E o maior teor de não metais e o menor teor de metais nobre com o mínimo de variações de inclinação.

As amostras 8, 10, 11 e 14 são aquelas onde a inclinação da bandeja sofre menos variações de inclinação entre as etapas. A amostra 14 é aquela que apresenta a menor perda de metais: 4% e as amostras 8 e 11 apresentam os maiores teores de não metais no rejeito: 72%.

O melhor conjunto de variáveis a serem usadas no concentrador Mozley é aquela que combina a menor perda de metais nobre, a menor quantidade de não metais nas frações de interesse e a menor variação de inclinação da bandeja. Desta forma, a

Tabela 22 mostra a distribuição dos metais em cada uma das frações e a quantidade percentual do metal na amostra.



**Tabela 21: Resultados dos Ensaio no Concentrador Mozley com PCI de LCD.**

Ensaio	Frações Obtidas	% Amostra	Amostra		Fração	
			% Metais	% Não Metais	% Metais	% Não Metais
Amostra 8	A	41%	69%	18%	76%	24%
Massa Inicial 50,5g	B	10%	13%	7%	60%	40%
Massa Final 49,17g - 97%	C	4%	4%	4%	48%	52%
% Metais 44%	D	29%	8%	46%	12%	88%
% Não Metais 56%	E	16%	5%	26%	14%	86%
Amostra 9	A	36%	70%	14%	77%	23%
Massa Inicial 50,0g	B	9%	16%	5%	70%	30%
Massa Final 47,84g - 96%	C	25%	7%	38%	11%	89%
% Metais 40%	D	7%	1%	11%	5%	95%
% Não Metais 60%	E	22%	7%	33%	12%	88%
Amostra 10	A	46%	71%	26%	69%	31%
Massa Inicial 50,1g	B	21%	14%	26%	30%	70%
Massa Final 48,88g - 98%	C	2%	0,4%	3%	11%	89%
% Metais 45%	D	1%	0,3%	1%	21%	79%
% Não Metais 55%	E	31%	14%	45%	20%	80%
Amostra 11	A	41%	71%	20%	71%	29%
Massa Inicial 50,4g	B	11%	15%	7%	59%	41%
Massa Final 49,29g - 98%	C	1%	1%	1%	49%	51%
% Metais 42%	D	18%	5%	28%	12%	88%
% Não Metais 58%	E	29%	8%	44%	11%	89%
Amostra 12	A	49%	74%	30%	64%	36%
Massa Inicial 50,0g	B	13%	13%	12%	44%	56%
Massa Final 47,68g - 95%	C	10%	3%	16%	12%	88%
% Metais 42%	D	2%	0,3%	2%	9%	91%
% Não Metais 58%	E	27%	10%	39%	15%	85%
Amostra 13	A	36%	65%	13%	80%	20%
Massa Inicial 50,2g	B	6%	8%	5%	54%	46%
Massa Final 49,52g - 99%	C	1%	1%	1%	62%	38%
% Metais 45%	D	12%	5%	17%	20%	80%
% Não Metais 55%	E	45%	21%	64%	21%	79%
Amostra 14	A	42%	78%	17%	75%	25%
Massa Inicial 50,4g	B	13%	16%	11%	49%	51%
Massa Final 49,63g - 98%	C	11%	3%	16%	11%	89%
% Metais 41%	D	1%	1%	1%	38%	62%
% Não Metais 59%	E	34%	3%	55%	4%	96%
Amostra 15	A	55%	86%	32%	67%	33%
Massa Inicial 50,2g	B	14%	10%	17%	30%	70%
Massa Final 49,76g - 99%	C	1%	1%	0,5%	62%	38%
% Metais 43%	D	19%	1%	32%	3%	97%
% Não Metais 57%	E	12%	2%	19%	8%	92%

**Tabela 22: Distribuição de Metais nos Ensaios com Concentrador Mozley para PCI de LCD.**

<b>Amostra 8</b>	<b>Al (%)</b>	<b>Pb (%)</b>	<b>Cu (%)</b>	<b>Fe (%)</b>	<b>Ni (%)</b>	<b>Au (%)</b>	<b>Ag (%)</b>	<b>Zn (%)</b>
<b>%Metal Amostra</b>	1,26%	0,12%	15,24%	2,91%	0,34%	0,24%	0,11%	0,39%
<b>A</b>	44%	89%	51%	89%	90%	68%	78%	93%
<b>B</b>	13%	7%	33%	5%	6%	20%	12%	5%
<b>C</b>	3%	1%	5%	2%	1%	2%	3%	0%
<b>D</b>	30%	3%	5%	2%	1%	6%	4%	1%
<b>E</b>	10%	0%	6%	2%	2%	4%	3%	1%
<b>A+B+C</b>	60%	97%	89%	96%	97%	90%	97%	98%
<b>D+E</b>	40%	3%	11%	4%	3%	10%	3%	2%
<b>Amostra 9</b>	<b>Al (%)</b>	<b>Pb (%)</b>	<b>Cu (%)</b>	<b>Fe (%)</b>	<b>Ni (%)</b>	<b>Au (%)</b>	<b>Ag (%)</b>	<b>Zn (%)</b>
<b>%Metal Amostra</b>	1,22%	0,17%	12,54%	2,95%	0,07%	0,12%	0,08%	0,07%
<b>A</b>	14%	1%	63%	84%	39%	18%	47%	46%
<b>B</b>	36%	38%	20%	10%	39%	51%	33%	47%
<b>C</b>	22%	9%	6%	1%	3%	2%	2%	1%
<b>D</b>	5%	1%	1%	1%	2%	2%	1%	1%
<b>E</b>	23%	51%	10%	4%	17%	27%	17%	5%
<b>A+B+C</b>	72%	48%	89%	95%	81%	71%	82%	94%
<b>D+E</b>	28%	52%	11%	5%	19%	29%	18%	6%
<b>Amostra 10</b>	<b>Al (%)</b>	<b>Pb (%)</b>	<b>Cu (%)</b>	<b>Fe (%)</b>	<b>Ni (%)</b>	<b>Au (%)</b>	<b>Ag (%)</b>	<b>Zn (%)</b>
<b>%Metal Amostra</b>	3,85%	0,13%	14,97%	3,54%	0,37%	0,39%	0,24%	0,41%
<b>A</b>	31%	39%	64%	87%	85%	67%	70%	97%
<b>B</b>	51%	48%	19%	7%	3%	10%	8%	1%
<b>C</b>	0%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%
<b>D</b>	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
<b>E</b>	18%	13%	16%	6%	12%	23%	22%	3%
<b>A+B+C</b>	82%	87%	83%	94%	88%	77%	78%	97%
<b>D+E</b>	18%	13%	17%	6%	12%	23%	22%	3%
<b>Amostra 11</b>	<b>Al (%)</b>	<b>Pb (%)</b>	<b>Cu (%)</b>	<b>Fe (%)</b>	<b>Ni (%)</b>	<b>Au (%)</b>	<b>Ag (%)</b>	<b>Zn (%)</b>
<b>%Metal Amostra</b>	2,14%	0,07%	13,41%	2,77%	0,57%	0,28%	0,27%	0,77%
<b>A</b>	67%	86%	67%	92%	87%	70%	77%	94%
<b>B</b>	17%	9%	19%	6%	10%	21%	16%	5%
<b>C</b>	0%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%
<b>D</b>	7%	2%	4%	1%	1%	3%	2%	0%
<b>E</b>	9%	3%	9%	1%	2%	6%	5%	1%
<b>A+B+C</b>	84%	95%	88%	98%	97%	92%	94%	99%
<b>D+E</b>	16%	5%	12%	2%	3%	8%	6%	1%

<b>Amostra 12</b>	<b>Al (%)</b>	<b>Pb (%)</b>	<b>Cu (%)</b>	<b>Fe (%)</b>	<b>Ni (%)</b>	<b>Au (%)</b>	<b>Ag (%)</b>	<b>Zn (%)</b>
<b>%Metal Amostra</b>	3,51%	0,11%	13,24%	2,16%	0,33%	0,32%	0,29%	0,29%
<b>A</b>	50%	40%	63%	89%	80%	60%	65%	95%
<b>B</b>	19%	46%	18%	5%	9%	14%	14%	2%
<b>C</b>	2%	1%	4%	1%	2%	3%	2%	0%
<b>D</b>	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
<b>E</b>	28%	13%	15%	5%	9%	23%	19%	3%
<b>A+B+C</b>	71%	87%	85%	95%	90%	77%	81%	97%
<b>D+E</b>	29%	13%	15%	5%	10%	23%	19%	3%
<b>Amostra 13</b>	<b>Al (%)</b>	<b>Pb (%)</b>	<b>Cu (%)</b>	<b>Fe (%)</b>	<b>Ni (%)</b>	<b>Au (%)</b>	<b>Ag (%)</b>	<b>Zn (%)</b>
<b>%Metal Amostra</b>	2,83%	0,19%	13,35%	2,56%	0,36%	0,27%	0,21%	0,21%
<b>A</b>	42%	41%	65%	94%	80%	45%	48%	91%
<b>B</b>	17%	4%	13%	2%	5%	13%	14%	2%
<b>C</b>	0%	33%	2%	0%	0%	0%	1%	0%
<b>D</b>	1%	0%	1%	0%	1%	0%	0%	0%
<b>E</b>	40%	22%	19%	4%	14%	42%	37%	7%
<b>A+B+C</b>	59%	78%	80%	96%	86%	58%	63%	93%
<b>D+E</b>	41%	22%	20%	4%	14%	42%	37%	7%
<b>Amostra 14</b>	<b>Al (%)</b>	<b>Pb (%)</b>	<b>Cu (%)</b>	<b>Fe (%)</b>	<b>Ni (%)</b>	<b>Au (%)</b>	<b>Ag (%)</b>	<b>Zn (%)</b>
<b>%Metal Amostra</b>	3,45%	0,21%	13,85%	2,80%	0,49%	0,40%	0,38%	0,53%
<b>A</b>	44%	55%	69%	91%	81%	56%	62%	96%
<b>B</b>	22%	20%	21%	4%	8%	20%	17%	2%
<b>C</b>	7%	2%	2%	0%	1%	2%	2%	0%
<b>D</b>	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
<b>E</b>	27%	23%	8%	5%	10%	22%	19%	2%
<b>A+B+C</b>	73%	77%	92%	95%	90%	77%	80%	98%
<b>D+E</b>	27%	23%	8%	5%	10%	23%	20%	2%
<b>Amostra 15</b>	<b>Al (%)</b>	<b>Pb (%)</b>	<b>Cu (%)</b>	<b>Fe (%)</b>	<b>Ni (%)</b>	<b>Au (%)</b>	<b>Ag (%)</b>	<b>Zn (%)</b>
<b>%Metal Amostra</b>	<b>3,08%</b>	<b>0,31%</b>	<b>11,83%</b>	<b>2,59%</b>	<b>0,38%</b>	<b>0,32%</b>	<b>0,34%</b>	<b>0,41%</b>
<b>A</b>	79%	90%	79%	96%	91%	89%	89%	97%
<b>B</b>	10%	7%	13%	2%	5%	8%	7%	1%
<b>C</b>	0%	0%	1%	0%	1%	0%	1%	0%
<b>D</b>	7%	1%	3%	1%	1%	1%	1%	1%
<b>E</b>	4%	2%	4%	1%	2%	2%	2%	1%
<b>A+B+C</b>	90%	97%	94%	98%	97%	97%	97%	99%
<b>D+E</b>	10%	3%	6%	2%	3%	3%	3%	1%

Na

Tabela 22, observa-se que o alumínio e o ouro não tem o comportamento esperado na maioria das amostras, uma vez que, há um percentual razoável desses metais nas frações concentradas (A+B+C).

A fim de definir qual a melhor configuração do concentrador deve-se levar em conta o percentual de metais de interesse na fração concentrada, a pureza da fração e as variáveis operacionais, como citado anteriormente. As amostras 8, 11 e 15 são aquelas que apresentam a maior recuperação de ouro, prata e cobre. Embora a amostra 15 seja aquela que apresenta o melhor resultado em termos de recuperação de metais – 97% ouro, 97% prata e 94% cobre, observa-se que na fração concentrada ficou retida 49% da fração não metálica (Tabela 21), o que representa 41% da fração concentrada. Além disso, as variáveis operacionais não são favoráveis.

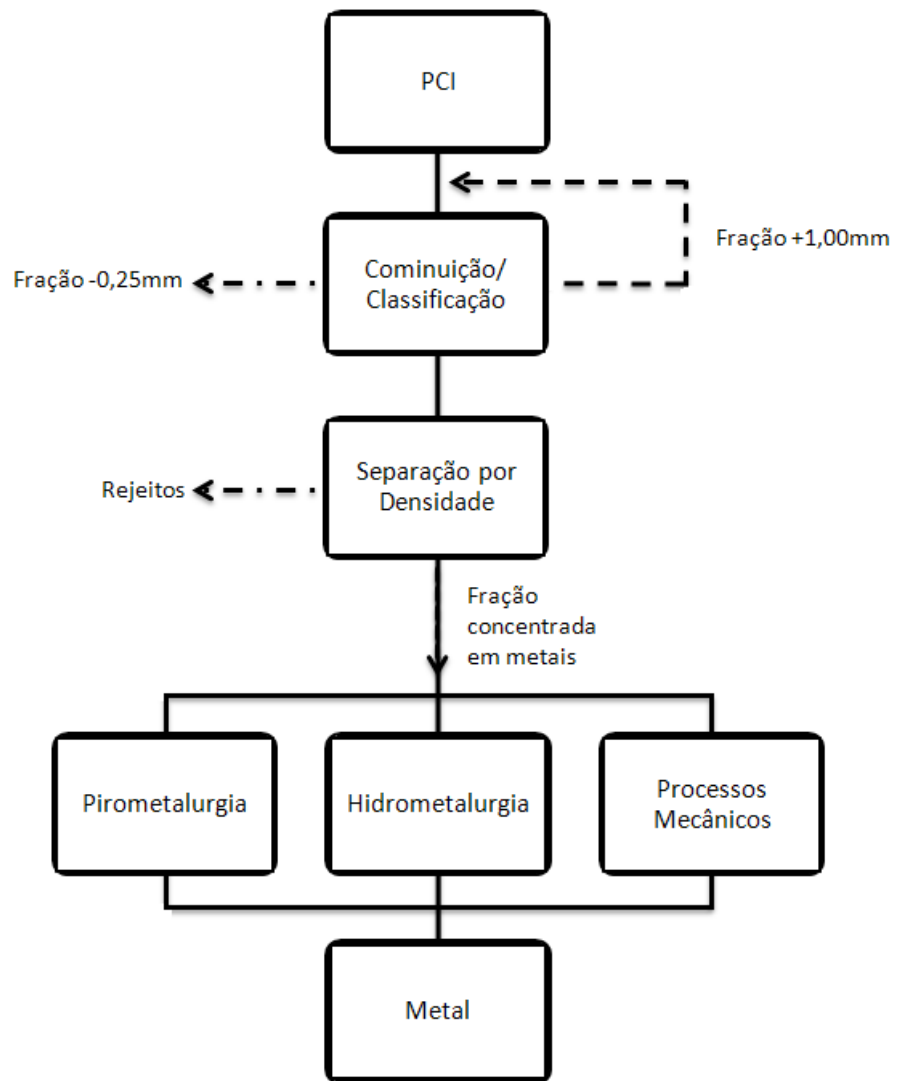
A amostra 8 apresenta recuperação de 90%, 97% e 89% para ouro, prata e cobre respectivamente e o teor de não metais na amostra é de 29%. As variáveis operacionais são favoráveis uma vez que é necessário mudar a inclinação da mesa apenas uma vez logo no início do ensaio.

A amostra 11 apresenta uma recuperação de 92%, 94% e 88% para ouro, prata e cobre respectivamente e o teor de não metais na amostra é de 32%. As variáveis operacionais são favoráveis uma vez que a inclinação da bandeja é a mesma durante todo o ensaio.

A amostra 13 apresenta o menor teor de recuperação, sendo que neste ensaio perdeu-se 42% do ouro, 37% da prata e 20% do cobre presente na amostra e o teor de não metais na amostra é de 24%. As variáveis operacionais não são favoráveis uma vez que a inclinação da bandeja e a vazão tem que ser alterada em cada etapa do processo.

Ao comparar os resultados obtidos das amostras 11 e 13 observa-se que a amostra 13 tem o melhor resultado quanto a concentração de não metais na fração concentrada, porém tem os piores resultados na contração de metais de interesse e de metais como um todo, ou seja com este ensaio foi possível concentrar apenas 74% dos metais presentes na amostra enquanto que na amostra 11 foi possível concentrar 87% dos metais.

A Figura 50 mostra um fluxograma que indica em qual estágio do processo de reciclagem de placas de circuito impresso o uso da separação por densidade pode ser empregado.



**Figura 50: Fluxograma Esquemático do Processo para a Concentração de Metais Utilizando Separação por Densidade.**

## 6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se afirmar que:

- Os monitores de LCD são compostos a partir de uma estrutura básica principal que consiste da tampa dianteira, borda polimérica, tela de LCD, PCI e tampa posterior, sendo esta última a de maior impacto sobre a massa do monitor.
- Os polímeros que constituem o monitor são em sua maioria termoplásticos como PC, ABS e PET desta forma podem ser reciclados.
- A tela de LCD por si só apresenta uma estrutura complexa com diversos materiais presentes. Entre eles, podem-se citar: termoplásticos, cerâmicos e metais. Os polímeros estão presentes principalmente nas folhas difusoras (acrílico e poliéster), folha reflexiva (acrílico e PET) e perspex (acrílico e PC). O material cerâmico são as camadas de vidro preenchidas com cristal líquido e que possuem a camada TFT e conseqüentemente o óxido de índio e óxido de estanho. Destes, o óxido de índio é o que possui o maior apelo econômico para reciclagem.
- As placas de circuito impresso apresentam quantidades razoáveis de metais (média de 30%). O que torna a sua reciclagem interessante é a presença de ouro e prata em função do seu valor de mercado e o cobre em função da quantidade.
- A partir da caracterização da periculosidade dos resíduos conclui-se que a tela de vidro é um resíduo classe I – perigoso, devido a presença de fluoreto acima dos limites estabelecidos pela norma. A PCI é um resíduo classe IIA – não inerte, devido a presença de cobre e chumbo acima dos limites estabelecidos pela norma para o ensaio de solubilização.

- Nos ensaios em meio denso, observa-se que a granulometria que tem melhor grau de liberação é a  $-1,0+0,25\text{mm}$ , embora o ouro não tenha ficado na fração de interesse; esta foi a granulometria utilizada no concentrador Mozley.
- Após a realização dos ensaios no concentrador Mozley e da caracterização das frações, conclui-se que é possível concentrar uma maior quantidade de metais utilizando as seguintes variáveis: vazão de água de  $0,4\text{L}/\text{min}$ ; inclinação da bandeja igual a  $0,26^\circ$  e duração de  $1,5$  minutos para cada uma das etapas.
- O uso do concentrador Mozley com PCI provenientes de LCD permitiu recuperar  $87\%$  dos metais nas frações concentradas, sendo  $92\%$  do ouro,  $94\%$  da prata e  $88\%$  do cobre originalmente existente na placa.

## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Estudar a influência da forma das partículas, como no caso do ouro, no processamento mecânico;
- Estudar rotas de reciclagem alternativas para frações com granulometrias inferiores a 0,25mm;
- Realizar ensaios em uma mesa Wilfley em escala industrial utilizando os parâmetros definidos no concentrador Mozley;
- Buscar a recuperação de outros materiais nobres na tela de LCD como o índio.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- 1 - DIRECTIVE 2002/96/EC, (2003). **Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)**. Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:037:0024:0038:en:PDF>. Acesso em: Março de 2013.
- 2 - EUROPEAN COMMISSION. **Recast of the RoHS Directive**. Disponível em: [http://ec.europa.eu/environment/waste/rohs\\_eee/](http://ec.europa.eu/environment/waste/rohs_eee/). Acesso em: Março de 2013.
- 3 - Lei N° 12.305 de 2 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm). Acesso em Março de 2013.
- 4 - WIDMER, R.; OSWALD-KRAPF, H.; SINHA-KHETRIWAL, D.; SCHNELLMANN, M.; BÖNI, H. (2005). **Global perspectives on e-waste**. In: Environmental Impact Assessment Review. 25 (2005) 436 – 458.
- 5 - SCHLUEP, M.; HAGELUEKEN, C.; KUEHR, R.; MAGALINI, F.; MAURER, C.; MESKERS, C.; MUELLER, E.; WANG, F. (2009) **RECYCLING – FROM E-WASTE TO RESOURCES**. Disponível em: [http://www.unep.org/PDF/PressReleases/EWaste\\_publication\\_screen\\_FINALVERSION-sml.pdf](http://www.unep.org/PDF/PressReleases/EWaste_publication_screen_FINALVERSION-sml.pdf). Acesso em: Março de 2013.
- 6 - BANDINI, M. (2009). **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. In: Seminário Internacional de Resíduos Eletroeletrônicos. Minas Gerais, Brasil, 12 – 14 de agosto de 2009. Disponível em: [http://www.mma.gov.br/port/conama/reuniao/dir1088/PolNacResiduosSolidos\\_MarcosBandini\\_10dez09.pdf](http://www.mma.gov.br/port/conama/reuniao/dir1088/PolNacResiduosSolidos_MarcosBandini_10dez09.pdf). Acesso em: Março de 2013.
- 7 - INNOVATIONS REPORT. (2004) **Recycling liquid crystal display screens**. Disponível em: [http://www.innovations-report.com/html/reports/environment\\_sciences/report-36773.html](http://www.innovations-report.com/html/reports/environment_sciences/report-36773.html). Acesso em: Março de 2013.
- 8 - DISPLAY SEARCH. (2009). **TV Demand Outlook Improves; Revenues to Resume Growth in 2010**. Disponível em: [http://www.displaysearch.com/cps/rde/xchg/displaysearch/hs.xsl/091229\\_tv\\_demand\\_outlook\\_improves\\_revenues\\_resume\\_growth\\_in\\_2010.asp](http://www.displaysearch.com/cps/rde/xchg/displaysearch/hs.xsl/091229_tv_demand_outlook_improves_revenues_resume_growth_in_2010.asp). Acesso em: Março de 2013.
- 9 - AOC. (2012). **AOC maintains top ten position in European display market**. Disponível em: <http://www.aoc-europe.com/en/news-media/news/newsdetail-en/artikel/details/aoc-behauptet-sich-unter-top-ten-im-europaeischen-display-markt.html?cHash=d3fa1bbca4d3b431911b519d359b36fa>. Acesso em: Março de 2013.

- 
- 10 - MURUGAN, R., V.; BHARAT, S., DESHPANDE, A., P.; VARUGHESE, S.; HARIDOSS, P. (2008). **Milling and separation of the multi-component printed circuit board materials and the analysis of elutriation based on a single particle model.** In: Powder Technology. 183 (2008) 169-176.
- 11 - VEIT, H. M. **Emprego do processamento mecânico na reciclagem de sucata de placas de circuito impresso.** Dissertação de Mestrado em Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. UFRGS. Porto Alegre 2001.
- 12 - CUI, J.; ZHANG, L. (2008). **Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review.** In: Journal of Hazardous Materials. 158 (2008) 228-256.
- 13 - CUI, J.; FORSSBERG, E. (2003). **Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review.** In: Journal of Hazardous Materials. B99 (2003) 243-263.
- 14 - RYAN, A.; O' DONOGHUE, L.; LEWIS, H. (2011) **Characterizing components of liquid crystal displays to facilitate disassembly.** In: Journal of Cleaner Production. 19 (2011) 1066 – 1071.
- 15 - MESTER, A.; FRAUNHOLCZ, N.; VAN SCHAİK, A.; REUTER, M.A. (2005) **Characterization Of The Hazardous Components In End-Of-Life Notebook Display.** In: Light Metals 2005. Calgary, Canada, 21 – 24 de agosto de 2005.
- 16 - MAINLAND HIGH SCHOOL. **Liquid crystal applications.** Disponível em: <http://mainland.cctt.org/istf2007/one.asp>. Acesso em: Março de 2013.
- 17 - DEN BOER, W. (2005). **Active Matrix Liquid Crystal Displays.** Newnes, 1º Edição.
- 18 - PLASMA.COM. **What is TFT LCD TV and LCD Monitor Panel?** Disponível em: [http://www.plasma.com/classroom/what\\_is\\_tft\\_lcd.htm](http://www.plasma.com/classroom/what_is_tft_lcd.htm). Acesso em: Março de 2013.
- 19 - HECKMEIER, M.; LÜSSEM, G.; TARUMI, K.; BECKER, W. **Liquid Crystals for Active Matrix Displays.** In: Merck.
- 20 - BECHTOLD, I. H. **Efeitos de Superfícies de Contorno na Orientação de Cristais Líquidos Liotrópicos.** Dissertação de Mestrado em Física. USP. São Paulo 2000.
- 21 - ASADA, A. (1990). **Electronic Displays: A Revealing Look at the Latest in LCDs.** In: Display Devices Dempa Publications. 1990.
- 22 - CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 2007.** Trad. Sérgio Murilo Stamile Soares. Ver. Paulo Emílio Valadão de Miranda.
- 23 - UNIVERSITY OF DELAWARE. **Mudanças de Estado e Propriedades Coligativas.** Disponível em: <http://www.eecis.udel.edu/~portnoi/academic/academic-files/liquids.html>. Acesso em: Março de 2013.

- 
- 24 - JOHNSTON, B. (2003). **A Gallery of Liquid Crystal Photomicrographs**. In: Micscape Magazine, Canadá, 2003.
- 25 - GRAY, G. W. (1987). **Thermotropic liquid crystals**. New York, Biddles, 1987. p. 10-33.
- 26 - CAL POLY PHISICS DEPARTMENT. **Liquid Crystals**. Disponível em: <http://www.calpoly.edu/~jfernsle/Research/Liquid%20Crystals/LCResearch.html>. Acesso em: Março de 2013.
- 27 - PHASES OF LIQUID CRYSTALS. **Liquid Crystals Phases**. Disponível em: <http://plc.cwru.edu/tutorial/enhanced/files/lc/phase/phase.htm>. Acesso em: Março de 2013.
- 28 - MACDONALD, R. **Liquid crystals – fascinating state of matter or “soft is beautiful”**. Optical Institute of the Technical University of Berlin. Berlin, Alemanha.1998, p 1-4.
- 29 - OSADA, T., KUGLER, Th., BROMS, P., SALANECK, W.R. (1998). **Polymer-based light-emitting devices: investigations on the role of the indium-tin oxide (ITO) electrode**. Synthetic metals, 96 (1998) 77-80.
- 30 - TAVARES, V. **Caracterização e processamento de telas de cristal líquido visando a reciclagem**. Dissertação de Mestrado em Engenharia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo 2006.
- 31 - GREAT GLASS. **A brief history of glass**. Disponível em: [www.great-glass.co.uk/glass%20notes/histroy.htm](http://www.great-glass.co.uk/glass%20notes/histroy.htm). Acesso em: Março de 2013.
- 32 - HARBEN, P. W. **Raw materials for the glass industry – an industrial minerals consumer survey**. London, Metal Bulletin, 1977, p 15-56.
- 33 - SODA LIM GLASS. **Soda lime flat float glass**. Disponível em: [www.valleydesign.com/sodalime.html](http://www.valleydesign.com/sodalime.html). Acesso em: Março de 2013.
- 34 - LI, J.; GAO, S.; DUAN, H.; LIUA, L. (2009). **Recovery of valuable materials from waste liquid crystal display panel**. In: Waste Management. 29 (2009) 2033–2039.
- 35 - ESWARAI AH, C.; KAVITHA, T.; VIDYASAGAR, S.; NARAYANA, S.S. (2008) **Classification of metals and plastics from printed circuit boards (PCB) using air classifier**. In: Chemical Engineering and Processing 47 (2008) 565–576.
- 36 - DUAN, H.; HOU, K.; LI, J.; ZHU, X. (2011). **Examining the technology acceptance for dismantling of waste printed circuit boards in light of recycling and environmental concerns**. In: Journal of Environmental Management 92 (2011) 392-399.
- 37 - PARK, Y. J.; FRAY, D. J. (2009). **Recovery of high purity precious metals from printed circuit boards**. In: Journal of Hazardous Materials 164 (2009) 1152–1158.

- 
- 38 - YANG, T.; XU, Z.; WEN, J.; YANG, L. (2009) **Factors influencing bioleaching copper from waste printed circuit boards by *Acidithiobacillus ferrooxidans***. In: *Hydrometallurgy* 97 (2009) 29–32.
- 39 - GUO, J.; GUO, J.; XU, Z. (2009) **Recycling of non-metallic fractions from waste printed boards: a review**. In: *Journal of Hazardous Materials* 168 (2009) 567–590.
- 40 - GOOSEY, M.; KELLNER, R. (2002) **A Scoping Study end-of-life printed circuit boards**. Shipley Europe Limited. 2002
- 41 - SUM, E. (1991). **The recovery of metals from electronic scrap**. In: *JOM* (1991) 53-61.
- 42 - SHUEY, S.A., VILDAL, E.E., TAYLOR, P.R. (2006). **Pyrometallurgical Processing of Electronic Waste**. In: *SME Annual Meeting*. St. Louis, EUA, 27-29 de Março de 2006.
- 43 - ZHAO, Y., WEN, X., LI, B., TAO, D. (2004). **Recovery of copper from printed circuit boards**. In: *Minerals and Metal Processing* 21 (2004) 99–102.
- 44 - ZHANG, S.; FORSSBERG, E. (1997). **Mechanical separation-oriented characterization of electronic scrap**. In: *Resources, Conservation and Recycling* 21 (1997) 247–269.
- 45 - KIM, B.; LEE, J.; SEO, S.; PARK, Y.; SOHN, H. (2004). **A process for extracting precious metals from spent printed circuit boards and automobile catalysts**. In: *JOM* 56 (2004) 55-58.
- 46 - IJI, M.; YOKOYAMA, S. (1997). **Recycling of Printed Wiring Boards with mounted electronic components**. In: *Circuit World*. 23 (1997) 10 – 15.
- 47 - KOGAN, V. (2006). **Process for the Recovery of Precious Metals Scrap by Means of Hydrometallurgical Technique**. International Publication Number: WO 2006/013568 A2.
- 48 - LI, J.; SHRIVASTAVA, P.; GAO, Z.; ZHANG, H. (2004) **Printed Circuit board Recycling: A state-of-the-Art Survey**. In: *IEEE*. 27 (2004) 33-42.
- 49 - SEPÚLVEDA, A.; SCHLUEP, M.; RENAUD, F. G.; STREICHER, M.; KUEHR, R.; HAGELÜKEN, C.; GERECKE, A. C. (2010). **A review of the environmental fate and effects of hazardous substances released from electrical and electronic equipments during recycling: Examples from China and India**. In: *Environmental Impact Assessment Review* 30 (2010) 28–41
- 50 - PUCKETT, J.; BYSTER, L.; WESTERVELT, S.; GUTIERREZ, R.; DAVIS, S.; HUSSAIN, A.; DUTTA, M. (2002) **Exporting Harm The High-Tech Trashing of Asia**. Disponível em: <http://www.ban.org/E-waste/technotrashfinalcomp.pdf>. Acesso em: Março de 2013.

- 
- 51 - SAURAT, M.; BRINGEZU, S. (2008) **Platinum group metal flows of Europe, part 1: global supply, use in industry and shifting of environmental impacts.** In: Journal of industrial ecology 12 (5/6), (2008) 754-767.
- 52 - WUPPERTAL INSTITUTE FOR CLIMATE, ENVIRONMENT AND ENERGY. (2003). **Material intensity of materials, fuels, transport services.** Disponível em: [www.wupperinst.org/uploads/tx\\_wibeitrag/MIT\\_v2.pdf](http://www.wupperinst.org/uploads/tx_wibeitrag/MIT_v2.pdf). Acesso em: Março de 2013.
- 53 - GOLD INVESTING NEWS. **Gold Grain Morphology.** Disponível em: <http://goldinvestingnews.com/world-class-gold-deposits/gold-grain-morphology-valuable-method-in-gold-exploration>. Acesso em: Março de 2012.
- 54 - HAGELÜKEN, C.; MESKERS, C. (2008). **Mining our computers - Opportunities and challenges to recover scarce and valuable metals from end-of-life electronic devices.** In: Proceedings of Electronics Goes Green. Berlim, Alemanha, 09 de Setembro de 2008.
- 55 - KITCO. **Gold, Silver, Gold Price Silver Price, Gold Rate, Gold News.** Disponível em: <http://www.kitco.com/>. Acesso em: Março de 2013.
- 56 - BASEL CONVENTION. Disponível em: <http://www.basel.int>. Acesso em: Março de 2013.
- 57 - EUROPEAN COMMISSION. (2012). **Recast of the WEEE Directive.** Disponível em: [http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/index_en.htm). Acesso em: Março de 2013.
- 58 - ABINEE. **PNRS Logística Reversa de Resíduos Eletroeletrônicos.** Disponível em: <http://www.felsberg.com.br/wp-content/uploads/2013/03/Log%C3%ADstica-Reversa-REEE-ABINEE-Ademir.pdf> Acesso em: Julho de 13.
- 59 - ABNT NBR 10004 (Associação Brasileira de Normas Técnicas – Norma Brasileira) (2004). **Resíduos sólidos – Classificação.** Rio de Janeiro, 2004.
- 60 - ABNT NBR 10005 (Associação Brasileira de Normas Técnicas – Norma Brasileira) (2004). **Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004.
- 61 - ABNT NBR 10006 (Associação Brasileira de Normas Técnicas – Norma Brasileira) (2004). **Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004.
- 62 - TUNCUK, A.; STAZI, V.; AKCIL, A.; YAZICIC, E.Y.; DEVECI, H. (2012). **Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: Hydrometallurgy in recycling.** In: Minerals Engineering 25 (2012) 28–37

- 
- 63 - HAVLIK, T.; ORAC, D.; PETRANIKOVA, M.; MISKUFOVA, A.; KUKURUGYA, F.; TAKACOVA, Z. (2010) **Leaching of copper and tin from used printed circuit boards after thermal treatment.** In: Journal of Hazardous Materials 183 (2010) 866–873.
- 64 - HAGELÜKEN, C., (2006). **Improving metal returns and eco-efficiency in electronics recycling – a holistic approach for interface optimisation between pre-processing and integrated metals smelting and refining.** In: IEEE International Symposium on Electronics & the Environment. San Francisco, EUA, 8–11 de Maio de 2006.
- 65 - HAVLIK, T.; ORAC, D.; PETRANIKOVA, M.; MISKUFOVA, A. (2011) **Hydrometallurgical treatment of used printed circuit boards after thermal treatment.** In: Waste Management 31 (2011) 1542–1546.
- 66 - DE MARCO, I., CABALLERO, B.M., CHOMÓN, M.J., LARESGOITI, M.F., TORRES, A., FERNÁNDEZ, G., ARNAIZ, S. (2008). **Pyrolysis of electrical and electronic wastes.** In: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 82 (2008) 179–183.
- 67 - QUAN, C.; LI, A.; GAO, N.; DAN, Z. (2010). **Characterization of products recycling from PCB waste pyrolysis.** In: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 89 (2010) 102–106.
- 68 - TOHKA, A., LEHTO, H. (2005) **Mechanical and Thermal Recycling of Waste from Electric and Electrical Equipment.** In: Energy Engineering and Environmental Protection Publications, Espoo, 2005.
- 69 - ZHOU, Y.; QIU, K. (2010). **A new technology for recycling materials from waste printed circuit boards.** In: Journal of Hazardous Materials 175 (2010) 823–828.
- 70 - DORIN, R.; WOODS, R. (1991). **Determination of leaching rates of precious metals by electrochemical techniques.** In: Journal Applied Electrochemistry. 21 (5) (1991) 419.
- 71 - TRINDADE, R. B. E.; FILHO, O. B. **Extração de ouro: princípios, tecnologia e meio ambiente.** Centro de Tecnologia Mineral. p. 51-86.
- 72 - DONMEZ, B.; SEVIM, F.; COLAK, S. (2001). **Study on recovery of gold from decopperized anode slime.** In: Chemical Engineering & Technology 24 (1) (2001) 91–95.
- 73 - SONG, Q.; WANG, D.; CHENG, J. (1995). **New method of extracting gold and silver from high silver–gold concentrates.** In: Transactions of Nonferrous Metals Society of China 5 (3) (1995) 50–53 (English Edition).
- 74 - PANGUM, L.S.; BROWNER, R.E. (1996). **Pressure chloride leaching of a refractory gold ore.** In: Minerals Engineering. 9 (5) (1996) 547–556.
- 75 - FAGAN, R. K. **Chlorine based in-situ leaching of alluvial gold deposits.** In: AusIMM Extractive Metallurgy Conference. Kalgoorlie, Australia, 1992 p. 315–322.

- 
- 76 - BAGHALHA, M. (2007). **Leaching of an oxide gold ore with chloride/hypochlorite solutions.** In: International Journal of Mineral Processing. 82 (4) (2007) 178–186.
- 77 - ABRANTES, L.M.; COSTA, M.C. (1996). **Electro-oxidation as a pre-treatment for gold recovery.** In: Hydrometallurgy. 40 (1–2) (1996) 99–110.
- 78 - TRINDADE, R. B. E.; FILHO, O. B. **Extração de ouro: princípios, tecnologia e meio ambiente.** Centro de Tecnologia Mineral. p. 201-241.
- 79 - TRINDADE, R. B. E.; FILHO, O. B. **Extração de ouro: princípios, tecnologia e meio ambiente.** Centro de Tecnologia Mineral. p. 127-147.
- 80 - POPOV, K. I.; DJOKIĆ, S. S.; GRGUR, B. N. (2002). **Fundamental Aspects of Electrometallurgy.** Springer US, p. 1-3.
- 81 - VEGLIÒ, F.; QUARESIMA, R.; FORNARI, P.; UBALDINI, S. (2003). **Recovery of valuable metals from electronic and galvanic industrial wastes by leaching and electrowinning.** In: Waste Management 23 (2003) 245–252.
- 82 - SCOTT, K.; CHEN, X.; ATKINSON, J.W.; TODD, M.; ARMSTRONG, R.D. (1997). **Electrochemical recycling of tin, lead and copper from stripping solution in the manufacture of circuit boards.** In: Resources, Conservation and Recycling 20 (1997) 43-55.
- 83 - VEIT, H. M. (2005). **Reciclagem de Cobre de Sucatas de Placas de Circuito Impresso.** Tese de Doutorado. UFRGS. Porto Alegre, 2005.
- 84 - HAYES, P. C.. **Process Principles in Minerals and Materials Production.** Hayes Publishing CO. p. 29. Brisbane, Austrália, 1993.
- 85 MOHABUTH, N.; MILES, N. (2005) **The recovery of recyclable materials from Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) by using vertical vibration separation.** In: Resources, Conservation and Recycling 45 (2005) 60–69.
- 86 - LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., SALVADOR, L. M. A. (2004). **Tratamento de Minérios.** Rio de Janeiro. Cetem, 4º Edição.
- 87 - CHAO, G.; HUI, W.; WEI, L.; JIANGANG, F.; XIN, Y. (2011) **Liberation characteristic and physical separation of printed circuit board (PCB).** In: Waste Management 31 (2011) 2161–2166.
- 88 - SAMPAIO, C. H., TAVARES, L.M.M. **Beneficiamento Gravimétrico.** Editora UFRGS. 2005.
- 89 - LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., SALVADOR, L. M. A. (2004). **Tratamento de Minérios.** Rio de Janeiro. Cetem, 4º Edição, p. 271 – 301.

- 
- 90 - BURT, R.O.; MILLS, C. (1984) **Gravity Concentration Technology**. Amsterdam, Elsevier. c1984.
- 91 - RUBIO, J. (1988) **Carvão mineral - Caracterização e beneficiamento**. Vol. 1. Nova Linha Artes Gráficas. 1988.
- 92 - HORI, K.; TSUNEKAWA, M.; HIROYOSHI, N.; ITO, M. (2009) **Optimum water pulsation of jig separation for crushed plastic particles**. In: International Journal of Mineral Processing, 92 (2009) 103 – 108.
- 93 - FUERSTENAU, M. C.; HAN, K. N. (2003). Principles of Mineral Processing. SME. 2003.
- 94 - LABORATORY WILFLEY TABLES. Wilfley #13 Laboratory Size Table. Disponível em: <http://www.motive-traction.com.au/cgi-bin/engine.pl?Page=page.html&Rec=175>. Acesso em: Março de 2013.
- 95 - RAO, L. S.; BANDOPADHYAY, P. (1992). **Application of a Mozley mineral separator for treatment of coal washery rejects**. In: International Journal of Mineral Processing, 36 (1992) 137-150
- 96 - KRAUS, R. G.; EMMONS, E. D.; THOMPSON, J. S.; COVINGTON, A. M. (2008). **Infrared Absorption Spectroscopy of Polycarbonate at High Pressure**. In: Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 46 (2008) 734 - 742
- 97 - RAMESHA, S.; LEENA, K. H.; KUMUTHAB, K.; AROF, A.K. (2007). **FTIR studies of PVC/PMMA blend based polymer electrolytes**. In: Spectrochimica Acta Part A 66 (2007) 1237–1242
- 98 - BOER, W. (2005) **Active Matrix Liquid Crystal Displays**. Oxford, Elsevier.
- 99 - CHIEN, Y.; SHIH, P. (2006). **Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on the Combustion of Liquid Crystal Display Components**. In: Journal of Environmental Engineering, (2006) 1028-1033