

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA  
TESE DEFENDIDA POR Renata Andrade

E APROVADA PELA  
COMISSÃO JULGADORA EM 27/08/02.

  
ORIENTADOR

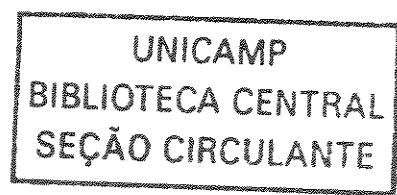
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

# Caracterização e Classificação de Placas de Circuito Impresso de Computadores como Resíduos Sólidos

Autora: **Renata Andrade**  
Orientador: **Waldir Antonio Bizzo**

28/02

200303106



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E FLUIDOS**

# **Caracterização e Classificação de Placas de Círcuito Impresso de Computadores como Resíduos Sólidos**

Autora: **Renata Andrade**  
Orientador: **Waldir Antonio Bizzo**

Curso: Engenharia Mecânica  
Área de Concentração: Térmica e Fluidos

Dissertação de mestrado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2002  
S.P. - Brasil

IDADE	BC	
CHAMADA	UNICAMP	
	An 24c	
EX		
DMBO	BCI	52572
DOC.	16-124/03	
C	<input type="checkbox"/>	D <input checked="" type="checkbox"/>
REÇO	R\$ 11,00	
ATA	13/03/02	
CPD		

CM00180696-1

310 283929

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

An24c

Andrade, Renata

Caracterização e classificação de placas de circuito  
impresso de computadores como resíduos sólidos /  
Renata Andrade.--Campinas, SP: [s.n.], 2002.

Orientador: Waldir Antonio Bizzo.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Computadores - Circuitos. 2. Resíduos. 3. Meio  
ambiente. I. Bizzo, Waldir Antonio. II. Universidade  
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia  
Mecânica. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E FLUIDOS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Caracterização e Classificação de Placas de  
Circuito Impresso de Computadores como  
Resíduos Sólidos**

Autora: **Renata Andrade**  
Orientador: **Waldir Antonio Bizzo**

---

Prof. Dr. Waldir Antonio Bizzo  
Faculdade de Engenharia Mecânica - UNICAMP

---

Prof. Dr<sup>a</sup>. Maria Lúcia Pereira da Silva  
Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos  
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

---

Prof. Dr. Arsênio Oswaldo Sevá Filho  
Faculdade de Engenharia Mecânica - UNICAMP

Campinas, 27 de agosto de 2002

## **Dedicatória:**

Sempre aos meus pais, as minhas irmãs, ao Aquino  
com todo o amor, dedico todas as minhas conquistas.

## *Agradecimentos*

Uma palavra especial de agradecimento a todos aqueles que, em momentos diferentes, foram importantes para a realização deste trabalho, sobretudo:

Ao Prof. Dr. Waldir Antonio Bizzo, pela orientação deste trabalho e pela confiança que depositou em mim.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo incentivo ao desenvolvimento deste estudo.

Aos professores Drs. Maria Lúcia Pereira da Silva e Arsênio Osvaldo Sevá Filho, que muito me honraram com suas participações na banca examinadora.

Aos professores Drs. Meuris Gurgel Carlos da Silva e Rodnei Bertazzoli pela participação e sugestões apresentadas em meu exame de qualificação.

Ao Laboratório de Engenharia Eletroquímica do Departamento de Materiais - FEM – Unicamp pelo espaço e equipamento cedido para realização das análises e, em especial, a Nelly e ao Daniel pela receptividade e ajuda.

Ao Laboratório de Controle de Qualidade da Indústria de Baterias Tudor/MG pelo espaço e equipamento cedido para realização das análises e, em especial, ao Sidney e a Marlene pela atenção e ajuda.

Ao Departamento de Patrimônio da Unicamp pelas informações concedidas e, em especial a Nanci Ceccatto Pedro da Silva pela atenção.

Ao Serviço de Patrimônio da Faculdade de Engenharia Mecânica pelas informações e material cedido, em especial ao Welington Gardelito S. Diniz pela atenção dispensada.

Ao Departamento de Engenharia de Suporte e Apoio do Centro para Manutenção de Equipamentos pelo material cedido e, em especial ao Marcos Sérgio Zanchetta pela atenção dispensada.

Aos funcionários da Biblioteca da Área de Engenharia (BAE), pela atenção dispensada sempre.

Aos funcionários da Seção de Informática da Faculdade de Engenharia Mecânica (SIFEM), pela colaboração e atenção dispensada.

Ao técnico do Laboratório Didático do Departamento de Engenharia Térmica e Fluidos Luiz Zanaga, pela ajuda e atenção.

Aos funcionários da Oficina Mecânica, Luiz Gama, Jefferson Antônio de Souza e Gabriel Ferraz Gostautas pela ajuda e atenção.

À secretaria do Departamento de Engenharia Térmica e Fluidos (DETF), Cleusa Vasconcelos. Obrigada pela ajuda e carinho.

Aos funcionários da secretaria de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, pela atenção dispensada.

Ao funcionário da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM), Jonas Roberto, pelas cópias desta tese e pela atenção dispensada.

## *Agradecimento Especial*

A Deus que, com seu amor, possibilitou minha chegada até aqui

Aos meus pais Marta e David, pelo amor, carinho, dedicação, compreensão e incentivo durante todos os momentos.

À minha companheira de todas as horas, minha querida irmã Raquel (Rá). Obrigada por todo amor, carinho, amizade e pelos conselhos durante todos os momentos. Tenho muito orgulho de você.

Às minhas queridas irmãs Rinnara (Ri) e Rossana (Ró) por todo amor, carinho e amizade em todos os momentos, mesmo nos momentos em que estivemos distantes. Senti muitas saudades...

Ao Aquino por todo amor, carinho, amizade, ajuda, incentivo e confiança que você sempre depositou em mim.

Ao meu sempre amigo Heman de Oliveira Junior. Obrigado por todo amor durante todos esses anos, entre momentos felizes assim ficou um imenso carinho, uma grande amizade e a certeza de que tudo foi muito especial.

À minha amiga e mais nova “irmãzinha” Iraci Pereira Machado, por toda amizade, carinho, atenção, ajuda e confiança que me concedeu durante os últimos tempos. Você, o Aldionso e o Tomás já fazem parte da minha família. Muito obrigada, sempre.

Ao meu amigo Júlio Cézar Dainezi, pela nossa amizade, ajuda e otimismo durante todos os momentos.

Ao meu amigo Flávio Augusto Bueno Figueiredo, por todo carinho e ajuda nos momentos finais deste trabalho. Tenha certeza de que sua participação foi muito importante. Obrigada, com carinho.

Aos sempre amigos Ana Leda Bertoncini Simões, Andréia Fabi, Celso Andrade de Oliveira, José Jerônimo Teixeira e Regina Almeida pelo carinho e otimismo.

Aos amigos do DETF, Édna Santiago Benta dos Santos, Fernando Resende, Fernando Camargo, Fernando Parodi, Flávio Augusto Bueno Figueiredo, Iraci Pereira Machado, Jorge Recarte Henriquez, Júlio César Dainezi, Maria das Graças Enrique da Silva, Rogério Monteiro, Rogério Hory e Paulo Lenço, pelos bons momentos que passamos juntos, sentirei muitas saudades.

O conhecimento está a serviço da necessidade de viver, e essa necessidade criou no homem os órgãos do conhecimento.

Miguel Unamuno

## **Resumo**

ANDRADE, Renata, *Caracterização e Classificação de Placas de Circuito Impresso de Computadores como Resíduos Sólidos*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2002. 120p. Dissertação (Mestrado)

Equipamentos utilizados na indústria de processamento de dados ou de entretenimento podem conter mais de 30% de placas de circuito impresso. Estas placas são formadas por unidades isoladas e integradas e sua sucata contém cobre, chumbo, cádmio, zinco, estanho, bem como os metais preciosos, ouro, prata e platina. Além de metais e ligas metálicas, as placas de circuito impresso contêm vários compostos orgânicos e inorgânicos que de alguma forma prejudicam o ambiente. O objetivo deste trabalho foi a caracterização e classificação das placas de circuito impresso utilizadas em computadores como resíduos sólidos. Para atingi-lo foram utilizadas amostras de sucatas de placas de circuito impresso com componentes eletrônicos, que foram analisadas com intuito de caracterizar o resíduo como combustível e classificá-lo de acordo com a NBR 10004. O resultado da caracterização mostra que o resíduo possui características indesejáveis como combustível, devido ao teor de cinzas e baixo poder calorífico. A análise do lixiviado indicou um grande potencial de contaminação por metais pesados (chumbo e cádmio), classificando o resíduo como perigoso. Devido as características das sucatas eletrônicas, com grande potencial de contaminação ambiental, há necessidade de um sistema de gestão e controle da disposição final dos mesmos.

### *Palavra Chave*

- Computadores, Resíduos , Meio ambiente

## **Abstract**

ANDRADE, Renata, Characterization and Classification of Printed Circuit Boards of Computers as Solid Residues, Campinas,: University of Mechanical Engineering, State University of Campinas, 2002. 120p. Dissertation (Master's degree)

Equipments used in the data processing industry or entertainment they can contain more than 30% of printed circuit boards. These plates are formed by isolated units and integrated and its scrap contains copper, lead, cadmium, zinc, tin, as well as the precious metals, gold, silver and platinum. Besides metals and metallic leagues, the printed circuit boards contains several organics and inorganics compounds that in some way harm the environment. The objective of this work was the characterization and classification of the printed circuit boards used in computers as solid residues. To reach it, samples of scraps of printed circuit boards were used, that were analyzed with intention of characterizing the residue as fuel and to classify him/it in agreement with NBR 10004. The result of the characterization shows that the residue possesses undesirable characteristics as fuel, due to the tenor of ashes and low calorific power. The analysis of the leached indicated a great potential of contamination for heavy metals (lead and cadmium), classifying the residue as dangerous. Due the characteristics of the electronic scraps, with great potential of environmental contamination, there are need of an administration system and control of the final disposition of the same ones.

### **Key word**

- Computers, residues, environment

## Índice

Lista de Figuras .....	xv
Lista de Tabelas .....	xvi
1. Introdução .....	1
2. Revisão da Literatura.....	3
2.1. Resíduos Sólidos e sua origem.....	3
2.2. A geração e o processamento de resíduos .....	5
2.3. Resíduos sólidos no Brasil.....	6
2.4. Classificação dos resíduos sólidos .....	7
2.5. Tratamento e disposição de resíduos sólidos.....	14
2.5.1. Aterro sanitário .....	16
2.5.2. Incineração.....	18
2.5.3. Pirólise.....	21
2.5.4. Compostagem .....	24
2.5.5. Minimização de Resíduos.....	26
2.5.6. Redução Mecânica .....	28
2.6. Resíduos sólidos e a questão ambiental.....	29
2.7. Resíduos Sólidos Tecnológicos .....	33
2.7.1. Placas de Circuito Impresso .....	36
2.7.2. Processos de Fabricação.....	37
2.7.3. Insumos .....	43
2.7.4. Mercado Nacional e Internacional .....	43
3. Caracterização do problema.....	49
3.1. Destinação da Sucata.....	51

3.2. Contaminações ambientais por metais pesados .....	54
3.2.1. Contaminação atmosférica.....	55
3.2.2. Contaminação do solo .....	55
3.2.3. Contaminação aquática.....	56
4. Metodologia .....	57
4.1. Coleta e preparo da amostra .....	58
4.2. Separação por densidade.....	59
4.3. Caracterização das placas de circuito impresso .....	60
4.3.1. Análise Imediata e Análise Elementar .....	61
4.3.2. Medida de Poder Calorífico de Combustível em Bomba Calorimétrica.....	62
4.3.3. Lixiviação de Resíduos .....	64
4.3.4. Solubilização de Resíduos .....	65
4.3.5. Análise Massa Bruta .....	66
4.3.6. Análise Química.....	66
5. Resultados e Discussões .....	71
5.1. Separação por Densidade.....	71
5.2. Análise Imediata e Poder Calorífico .....	72
5.3. Caracterização do Resíduo – Lixiviação e Solubilização.....	75
5.4. Análise Química.....	79
6. Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros .....	83
Referências Bibliográficas.....	86
Apêndices .....	94

## **Lista de Figuras**

Figura 1 – Evolução das Vendas.....	35
Figura 2 – Produção de Placas Rígidas em 2000 .....	45
Figura 3 – Produção de Placas Flexíveis em 2000.....	45
Figura 4 – Placas de circuito impresso .....	58
Figura 5 – Porcentagem de material separado de placas de circuito impresso em contato com CHBr <sub>3</sub> ..	72

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1 – Produção de resíduos sólidos per capita em alguns países e cidades.....	7
Tabela 2 – Composição Média do Lixo no Brasil.....	10
Tabela 3 – Composição do lixo de São Paulo .....	10
Tabela 4 – Composição química do lixo de São Paulo .....	10
Tabela 5 – Outras características fisico-químicas do lixo de São Paulo - 2000.....	11
Tabela 6 – Concentração – limite máximo no extrato obtido no teste de lixiviação .....	14
Tabela 7 – Destino Final do Lixo (% em peso) .....	15
Tabela 8 – Aplicabilidade dos principais tipos de incineradores.....	20
Tabela 9 – Materiais de computadores que serão descartados até 2004* .....	34
Tabela 10 – Materiais presentes nos computadores (em relação ao peso total) .....	34
Tabela 11- Indicadores Econômicos .....	35
Tabela 12 - Importação e Mercado Interno de Placas de Circuito Impresso.....	46
Tabela 13 - Mercado – Alvo Brasileiro por Segmento ( $m^2$ ) – 1998/2000 .....	46
Tabela 14 - Produção Física de Placas de Circuito Impresso (em $m^2$ ) – 1989 e 1995/2001.....	47
Tabela 15 - Importação de Laminado e Faturamento Local (em US\$ mil) – 1997/2000 .....	48
Tabela 16 – Composição de um computador e índice de materiais recicláveis.....	49
Tabela 17 – Composição das placas de circuito impresso .....	50
Tabela 18 – Composição das placas de circuito impresso .....	50
Tabela 19 – Tabela de líquidos densos e sua densidade empregada em testes.....	59
Tabela 20 – Densidade de materiais presentes nas placas de circuito impresso.....	60
Tabela 21 – Análise imediata típica de alguns materiais combustíveis .....	62
Tabela 22 – Poder calorífico inferior de alguns materiais combustíveis.....	63
Tabela 23 – Concentração – limite máximo no extrato obtido no teste de lixiviação .....	64

Tabela 24 – Padrões para o teste de solubilização .....	65
Tabela 25 – Concentrações máximas de poluentes na massa bruta de resíduo .....	66
Tabela 26 – Determinações e técnicas utilizadas nas análises químicas.....	67
Tabela 27 – Resultados da análise imediata contendo frações de todos os tipos de placas .....	73
Tabela 28 – Resultado da análise elementar contendo frações de todos os tipos de placas.....	73
Tabela 29 – Resultado do poder calorífico contendo frações de todos os tipos de placas .....	73
Tabela 30 – Resultado do poder calorífico inferior contendo frações de todos os tipos de placas.....	74
Tabela 31 – Caracterização das placas de circuito impresso (laminado e componentes) - .....	74
Tabela 32 – Caracterizações típicas de alguns materiais combustíveis .....	75
Tabela 33 – Limites de detectabilidade .....	76
Tabela 34 – Resultados fisico-químicos - Lixiviado.....	76
Tabela 35 – Resultados fisico-químicos – Solubilizado .....	77
Tabela 36 – Resultados fisico-químicos – Massa bruta .....	78
Tabela 37 – Análise química das placas de circuito impresso – Frações leve e pesada .....	79
Tabela 38 – Análise química das placas de circuito impresso – Fração pesada.....	80
Tabela 39 - Porcentagem de metal encontrado em média nos minérios .....	81
Tabela 40 - Análise de cloro e bromo em placas de circuito impresso - amostra de todos os tipos.....	82

# **Capítulo 1**

## **Introdução**

Um dos setores da indústria que mais se desenvolve hoje em dia é o setor eletro-eletrônico. Aliado ao aumento do poder aquisitivo pela população, o consumo de bens desta natureza tem crescido constantemente nas últimas décadas, e a previsão é de que aumente cada vez mais.

Os equipamentos eletro-eletrônicos têm em geral uma vida útil não muito longa, pois novos modelos com novas tecnologias surgem a cada dia. Como a produção e o consumo aumentam constantemente, a quantidade de equipamentos obsoletos ou defeituosos aumenta na mesma proporção. Esses equipamentos obsoletos ou defeituosos necessitam ser descartados (Saito, 1994).

Atualmente muita sucata de equipamento eletro-eletrônico é disposta junto com o lixo doméstico, com exceção dos grandes aparelhos (geladeiras, fogões, etc.) cujos materiais são reutilizados pela indústria de produção secundária de metais. Assim, os equipamentos menores são depositados em aterros sanitários ou dispostos sem nenhum tratamento prévio (Lee, 1999).

As placas de circuito impresso e seus componentes eletrônicos, que são muito utilizadas em equipamentos da indústria eletro-eletrônica, fazem parte dessa sucata.

A sua composição é muito heterogênea, e é composta de uma maneira geral de plásticos, cerâmicos, metais base e metais preciosos. Toda essa mistura torna sua reciclagem bastante difícil, mas

em compensação, a presença de metais comuns e metais preciosos a torna uma matéria-prima interessante (Menetti e Tenório, 1996).

Também a presença de substâncias poluentes na sua composição estimula estudos para evitar a sua disposição diretamente no meio ambiente, podendo causar danos se dispostas de maneira inadequada.

Neste trabalho foram utilizadas placas de circuito impresso usadas em computadores pessoais, que são atualmente a maior fonte deste tipo de resíduo.

O objetivo deste trabalho é a caracterização e classificação das placas de circuito impresso utilizadas em computadores como resíduos sólidos, além da proposição e utilização de uma metodologia experimental específica para tal caracterização.

Para atingir o objetivo, foi feita uma revisão bibliográfica que consiste do levantamento da composição, utilização e descarte das placas de circuito impresso. Os métodos utilizados para caracterizar as placas de circuito impresso como resíduos sólidos, foram: análise imediata, análise elementar, determinação de poder calorífico e análises químicas. Para a classificação foram realizados ensaios de lixiviação e solubilização para avaliação da periculosidade de acordo com a norma NBR 10004.

## **Capítulo 2**

### **Revisão da Literatura**

#### **2.1. Resíduos sólidos e sua origem**

Um dos maiores desafios com que se defronta a sociedade moderna é o equacionamento da questão do lixo urbano. Além do expressivo crescimento da geração de resíduos sólidos, sobretudo nos países em desenvolvimento, observam-se, ainda, ao longo dos últimos anos, mudanças significativas em suas características. Essas mudanças são decorrentes principalmente dos modelos de desenvolvimento adotados e da mudança nos padrões de consumo.

O crescimento populacional aliado à intensa urbanização, acarreta a concentração da produção de imensas quantidades de resíduos e a existência cada vez menor de áreas disponíveis para a disposição desses materiais. Juntam-se a esses fatos, as questões institucionais, que tornam cada vez mais difícil para os municípios dar um destino adequado ao lixo produzido (Borsoi, 2002).

Segundo Figueiredo (1992), a idéia usual de resíduo, passa pela agregação aleatória de elementos bem definidos que, quando agrupados, se transformam em uma massa sem valor comercial e com um potencial de agressão ambiental variável segundo a sua composição. Mais do que isso, o potencial de agressão ambiental não pode ser estabelecido como o somatório dos potenciais de cada elemento individual, mas sim pelo conjunto combinado que compõe esses coquetéis. Assim, a massa de resíduos de uma sociedade tem sua gênese na agregação destes componentes que, além de salientar o

potencial de risco de cada elemento e acrescentar um incremento aleatório em função do conjunto, dificulta, ou até mesmo impossibilita, a reintegração destes elementos no meio natural.

Um agravante da questão está na participação, cada vez maior, de materiais artificiais e tóxicos na massa de resíduos, materiais estes oriundos dos processos de produção da atualidade na constante busca de aumento de produtividade, sem considerar a forte influência destes no agravamento da crise ambiental do planeta.

Ainda, segundo Figueiredo (1992), com relação ao reaproveitamento de alguns componentes da massa de resíduos, duas questões são particularmente interessantes. A primeira relaciona-se ao arbítrio na definição do que seja resíduo propriamente dito e componentes reaproveitáveis, a segunda, decorrente desta, se refere à característica ilimitada que o processo de produção assume, ao se considerar que os componentes residuais de um dado processo, ou oriundos do consumo, podem ser tratados como insumos de um novo processo.

Com relação à primeira questão, a arbitragem por parte dos empreendedores dos processos produtivos da atualidade, na escolha dos componentes da massa de resíduos passíveis de reutilização direta ou como insumos de outros processos, se dá a partir de considerações eminentemente conjunturais, econômicas e tecnológicas, o quê implica em se depositar nas mãos dos setores públicos, e portanto da sociedade, o ônus do tratamento dos demais materiais não atrativos economicamente, com alto potencial de agressão ambiental, e muitas vezes não equacionados quando a sua neutralização e destinação final, exigindo tecnologias complexas e dispendiosas. Esta questão remete uma outra, relativa ao papel e ao nível de responsabilidades globais assumidas pelos diversos tipos de empresas que compõem os sistemas produtivos do mundo atual.

No decorrer da história a população humana aumenta e se espalha rapidamente, e os subprodutos de suas atividades excedem a capacidade de adaptação do meio ambiente, que passa a não mais incorporar estes elementos em seus ciclos originais. Defrontamo-nos agora com um fluxo de elementos artificiais e/ou em altas concentrações, muitos deles tóxicos ou nocivos à vida na biosfera, que são depositados a todo momento nas várias regiões e subsistemas do planeta e que, em função da

própria dinâmica da natureza, retornam ao ciclo de vida da raça humana nas formas de poluição, radiação, contaminação de alimentos, chuva ácida, efeito estufa, destruição da camada de ozônio etc.

## **2.2. A geração e o processamento de resíduos**

A questão dos resíduos e seus problemas associados está intimamente ligada ao estágio cultural e ao desenvolvimento tecnológico das sociedades. Desta forma, a geração de resíduos parte de um primeiro nível referente à própria existência do homem, seu ciclo biológico e as formas mais primitivas de organização social, e avança, em intensidade, variedade e complexidade dos elementos, para outros níveis em função dos aspectos culturais das sociedades.

Através de uma ótica ampliada, a questão dos resíduos representa apenas parte de um contexto maior, ou seja, a questão ambiental, da qual não pode ser dissociada, e sua complexidade pode ser percebida em função da ampla rede de inter-relações à qual os resíduos estão intimamente ligados, exigindo em sua abordagem um tratamento abrangente, envolvendo desde aspectos sociais , políticos culturais, tecnológicos, econômicos até aspectos geográficos, regionais, climáticos, ambientais, entre outros.

Apesar dos vários problemas ocorridos ao longo da história humana ligados aos resíduos sólidos, houve época em que a questão não foi tratada com seriedade, o que, de certa forma, provocou um agravamento gradativo destes problemas. Entretanto, atualmente, por representar uma ameaça real ao meio ambiente e consequentemente ao próprio homem, os resíduos vêm conquistando a crônica mundial, especialmente no que diz respeito ao processamento, transporte e à disposição final dos resíduos industriais e urbanos, além do questionamento acerca da intensidade de geração dos resíduos e das possibilidades e limitações no seu reaproveitamento.

Dentre os vários fatores responsáveis pelo agravamento destas questões, dois são particularmente importantes: o aumento do consumo e a produção de materiais “artificiais”, ou seja, materiais que, embora ocorram no ambiente natural, estão presentes em quantidades restritas e em

baixas concentrações, e, no entanto, toneladas deste material são produzidas e utilizadas anualmente em todo o mundo (Figueiredo, 1992).

### **2.3. Resíduos sólidos no Brasil**

A análise do processo de urbanização pelo qual o Brasil vem passando é importante, tanto para a compreensão da dinâmica dos resíduos urbanos, quanto para a projeção dos possíveis e/ou prováveis quadros relativos à questão, com os quais nos depararemos no futuro.

No que diz respeito aos espaços urbanos propriamente ditos, a exemplo do ocorrido em vários países dos terceiro mundo, o rápido processo de urbanização brasileiro pegou as cidades despreparadas e sem estrutura referente aos serviços de transporte, saúde, educação, saneamento básico e, principalmente, infra-estrutura para a condução da questão do resíduos. Somados à escassez de recursos financeiros, os problemas se agravam a ponto de tornar, se não insuportável, muito difícil a vida da maior parte da população dos grandes centros urbanos (Borsoi, 2002).

Além dos problemas relacionados à urbanização em si, com relação à geração e ao processamento dos resíduos urbanos nunca houve uma preocupação em se estabelecer uma política abrangente para o tratamento da questão, e as poucas experiências realizadas até o momento, tanto com relação ao aproveitamento energético quanto a outras formas de processamento e destinação final, têm se caracterizado como iniciativas isoladas e de abrangência limitada a regiões. Isto reforça a total ausência de incentivos materiais e fiscalização no cumprimento da legislação ambiental do país.

No Brasil são produzidas diariamente, segundo o Manual de Gerenciamento Integrado (IPT/CEMPRE, 1995), cerca de 241 mil toneladas de lixo, dos quais 90 mil são de origem domiciliar. Dessa forma, a média nacional de produção de resíduos por habitante, estaria em torno de 600 g/dia. Uma cidade como São Paulo, no entanto, produz em média 1 kg/dia de lixo por habitante.

**Tabela 1 – Produção de resíduos sólidos per capita em alguns países e cidades**

PAÍSES	g/hab-dia	CIDADES	g/hab-dia
Canadá	1.900	México	900
Estados Unidos	1.500	Rio de Janeiro	900
Holanda	1.300	Buenos Aires	800
Suíça	1.200	Santiago de Chile	800
Japão	1.000	San Salvador	680
Europa	900	Tegucigalpa	520
Índia	400	Lima	500

Fonte: Oficina Pan-americana de La Salud/OMS, Zepeda/1999 citado por Borsoi/2002

Entretanto, se por um lado existe a dificuldade experimentada pelas autoridades no tratamento da questão dos resíduos, por outro lado, o tema vem ganhando espaço tanto em função da premente necessidade de reversão do quadro atual da destinação final no país, quanto em função do potencial de reaproveitamento que os resíduos representam, principalmente quando a questão é tratada sob uma ótica regionalizada. Soma-se a isto o fato de o reaproveitamento dos resíduos, vir de encontro a uma necessidade mais ampla, a nível mundial, de preservação do meio ambiente e promoção de um desenvolvimento ecologicamente sustentável.

#### **2.4. Classificação dos resíduos sólidos**

É muito importante conhecer as características físicas e químicas do resíduo, assim como suas tendências futuras, pois tais parâmetros possibilitam calcular a capacidade e tipo dos equipamentos de coleta e tratamento, e o destino final. Propriedades como o volume, por exemplo, determinam as dimensões dos locais de descarga ou estações de transbordo, além do tempo de vida de um aterro sanitário.

A composição serve para mostrar as potencialidades econômicas do lixo, subsidiando informações para a escolha do melhor e mais adequado sistema de tratamento e disposição final. Podemos dizer ainda que a eficiência dos sistemas de coleta e disposição final está fundamentada numa análise criteriosa das características físicas e químicas dos resíduos.

São várias as formas possíveis de se classificar o lixo.

- por sua natureza física: seco e molhado;
- por sua composição química: matéria orgânica e matéria inorgânica;
- pelos riscos potenciais ou meio ambiente: perigosos, não-inertes e inertes (NBR-10004).

Considerando-se o resíduo quanto à sua natureza e estado físico, podemos classificá-lo como sólido, líquido, gasoso e pastoso. Considerando-se o critério de origem e produção, podemos classificá-lo como: residencial, comercial, público, industrial, hospitalar, agrícola, entulho e outros (Teixeira, 2002).

**Lixo residencial** : Também chamado de lixo domiciliar ou doméstico, é constituído, em geral, por sobras de alimentos, invólucros, papéis, papelões, plásticos, vidros, etc.

**Lixo comercial:** É oriundo de estabelecimentos comerciais como lojas, lanchonetes, restaurantes, escritórios, hotéis, bancos etc. Os componentes mais comuns neste tipo de lixo são papéis, papelões, plásticos, restos de alimentos, embalagens de madeira, resíduos de lavagens, sabões etc.

**Lixo público:** É constituído da limpeza pública urbana – resíduos de varrição, capina, bem como animais mortos, entulho de obras e também materiais deixados nas ruas ou através de serviço de remoção especial.

**Lixo industrial:** É todo e qualquer resíduo resultante de atividades industriais, estando neste grupo o lixo proveniente das construções. Em geral, esta classe de resíduos é responsável pela contaminação do solo, ar e recursos hídricos, devido à forma de coleta e disposição final, que na maioria dos centros urbanos fica a cargo do próprio produtor. Segundo a CETESB (2002), os resíduos industriais são classificados em quatro categorias:

Categoria 1. Incluem-se nesta categoria os resíduos especiais quanto a coleta, acondicionamento, transporte e destino final, pois apresentam substancial periculosidade, real ou potencial, à saúde humana ou aos organismos vivos, e se caracterizam pela letalidade, não degradabilidade e pelos efeitos acumulativos adversos.

Categoria 2. Incluem-se nesta categoria os resíduos potencialmente biodegradáveis e /ou combustíveis.

Categoria 3. Incluem-se nesta categoria os resíduos considerados inertes e incombustíveis.

Categoria 4. Incluem-se nesta categoria os resíduos constituídos por uma mistura variável e heterogênea de substâncias que individualmente poderiam ser classificadas nas categorias 2 ou 3.

**Lixo Hospitalar:** Geralmente dividido em dois tipos, segundo a forma de geração: resíduos comuns, compreendendo os restos de alimentos, papéis, invólucros etc.; resíduos especiais, que são os restos oriundos das salas de cirurgias, das áreas de internação e isolamento. Estes últimos também podem ser denominados lixos sépticos, e seu acondicionamento, armazenamento local, coleta e disposição final exigem atenção especial devido aos riscos que podem oferecer.

**Lixo Agrícola:** Resíduos sólidos das atividades agrícolas e pecuária. Embalagens de fertilizantes e defensivos agrícolas, rações, restos de colheita, etc.

**Entulho:** Resto de obra, materiais de demolição, solo de escavações, etc.

Uma análise detalhada é recomendada, somente em casos especiais, como quando se pretende identificar algum elemento contaminante ou de grande importância na escolha de um sistema de coleta e tratamento. A análise consiste em determinar o teor de umidade e resíduo seco, o teor de substâncias voláteis e não voláteis, teor de carbono e hidrogênio, teor de nitrogênio, determinação de cálcio, sódio e potássio, determinação do pH e do poder calorífico. Estes métodos são recomendados por organizações internacionais como o Institute of Solid Waste da American Public Works Association-APWA.

A seguir serão mostrados alguns destes resultados, onde as composições foram obtidas segundo a metodologia recomendada.

**Tabela 2 – Composição Média do Lixo no Brasil**

Componentes	% Peso
Matéria orgânica	65
Papel e papelão	25
Metais ferrosos e não ferrosos	4
Plásticos	3
Vidros	3
Total	100,0

Fonte: Silva, 2002

**Tabela 3 – Composição do lixo de São Paulo**

Componente	(base úmida) % (em peso)
Matéria orgânica putrescível	37,80
Papel e papelão	29,60
Metal ferroso	5,40
Couro, borracha	2,20
Plástico fino e grosso	9,00
Vidro, terra, pedra	14,60
Madeira	0,80
Metal não-ferroso	0,10
Diversos	0,50

Fonte: IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2000

**Tabela 4 – Composição química do lixo de São Paulo**

Componente	Símbolo	Variação Média
Carbono	C	29,90-49,00
Oxigênio	O	65,24-40,97
Hidrogênio	H	3,65-6,37
Nitrogênio	N	1,09-2,20
Fósforo	P	0,02-1,14
Enxofre	S	0,10-,032

Fonte: IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas/2000

**Tabela 5 – Outras características físico-químicas do lixo de São Paulo - 2000**

Componente	Umidade	Valor
Relação carbono/nitrogênio	C/N	25,80
Peso específico	Kg/m <sup>3</sup>	192,00
Umidade	%	61,20
Sólidos voláteis	%	32,30
Inertes	%	6,50
Poder calorífico superior	kcal/kg	4267,00
Poder calorífico inferior	kcal/kg	1285,00

Fonte: CESP- Companhia Energética de São Paulo

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas

Rigorosamente a classificação dos resíduos quanto ao seu estado deveria traduzir o estado dos materiais que os compõem. Desta forma, resíduos líquidos seriam compostos por substâncias que ocorrem no ambiente na forma líquida, resíduos gasosos seriam compostos por gases, e os resíduos sólidos englobariam todos os materiais que ocorrem naturalmente no estado sólido, independente das dimensões das partículas. Segundo esta conceituação, grande parte dos efluentes seriam compostos por mais de uma fase.

No Brasil, a denominação de “resíduo sólido” inclui as descargas de materiais sólidos provenientes das operações industriais, comerciais, agrícolas e das atividades da comunidade. Entretanto, não inclui os materiais sólidos dissolvidos nos esgotos domésticos, lama e outros materiais sólidos dissolvidos ou dispersos em meios líquidos ou gasosos. Segundo Machado e Prata Filho (1999), em outras legislações, como a japonesa, a denominação de “resíduo sólido” é mais ampla, abrangendo “refugo de pequeno e grande porte, cinza, lama, excreções humanas, resíduos de óleo, resíduos alcalinos e ácidos, e materiais desnecessários que estejam no estado sólido ou líquido (excluindo materiais radioativos).

Uma questão importante está relacionada à possibilidade de escolha do meio a ser poluído através dos resíduos. Ilustrando esta questão, observa-se a prática indiscriminada da incineração de resíduos sólidos, promovida tanto pelos setores privados da sociedade quanto pelos órgãos públicos, ou ainda a opção intencional do despejo de resíduos sólidos nos meios hídricos. Estas práticas têm, em

geral, motivações ilícitas, e visam contornar a legislação ambiental e a fiscalização, que muitas vezes prioriza o controle a um dos meios físicos (Figueiredo, 1992).

A questão apresentada no parágrafo anterior tem ampliado a discussão acerca da eficiência da fiscalização ambiental convencional, e motivando a concepção de novos métodos mais eficientes na prevenção de impactos ambientais, através, por exemplo, da avaliação do potencial de risco associado tantos aos insumos e demais materiais empregados nos processos produtivos quanto às tecnologias adotadas.

A utilização de resíduos ou sucatas como matéria-prima para um outro processo, como também a destinação do resíduo é governado por leis específicas de cada país (Vrancken, K.C. et. al., 1999). Primeiramente estes resíduos ou sucatas devem ser caracterizados através das propriedades fisico-químicas e também pela avaliação da periculosidade destes, onde serão classificados de acordo com o seu risco em relação ao homem e ao meio ambiente.

No Brasil a avaliação de periculosidade deve ser feita de acordo com as Normas NBR 10004, 10005, 10006, 10007, que classificam os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que estes resíduos possam ter manuseio e destinação adequados. Quando as características de um determinado resíduo não puderem ser determinadas nos termos da NBR 10004, por motivos técnicos ou econômicos, a classificação deste resíduo caberá aos órgãos estaduais ou federais de controle da poluição e preservação ambiental. Para os efeitos da NBR 10004, os resíduos são classificados em:

- a) resíduos classe I – perigosos: são resíduos sólidos ou misturas de resíduos que apresentam risco à saúde pública e /ou apresentam efeito adverso sobre pessoas, animais e plantas, e ao meio ambiente. Os resíduos quando submetidos ao teste de lixiviação conforme a NBR 10005, que apresentam teores de poluentes no extrato lixiviado em concentração superior aos padrões constantes da listagem 7 da NBR 10004, são classificados como classe I (perigosos) .

- b) resíduos classe II – não-inertes: são resíduos que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I – perigosos – ou de resíduos classe III – inertes. Os resíduos classe II – não-inertes – podem ter propriedades, tais como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.
  
- c) resíduos classe III – inertes: são quaisquer resíduos que, quando amostrados de forma representativa, segundo a NBR 10007, e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme teste de solubilização, segundo a NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, conforme listagem nº 8 da NBR10004, excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor. Como exemplo destes materiais, podem-se citar rochas, tijolos, vidros e certos plásticos e borrachas que não são decompostos prontamente.

A periculosidade de um resíduo é caracterizado em função das suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas que pode oferecer:

- a) risco à saúde pública, provocando ou acentuando, de forma significativa, um aumento de mortalidade ou incidência de doenças;
  
- b) riscos ao meio ambiente, quando o resíduo é manuseado ou destinado de forma inadequada.

Os resíduos classificados como classe I, são aqueles que apresentam periculosidade, conforme definido anteriormente, ou uma das características seguintes:

- a) inflamabilidade: resíduos que podem inflamar sob certas condições ou que são espontaneamente inflamáveis.
  
- b) corrosividade: resíduos corrosivo, ácidos ou bases que são capazes de corroer metais.
  
- c) reatividade: resíduos reativos são instáveis sob condições “normais”. Eles podem causar explosões, fumaças tóxicas, gases ou vapores quando misturados com água.
  
- d) patogenicidade: resíduo patogênico é aquele que contém microorganismos ou suas toxinas capazes de produzir doenças.

e) Toxicidade: resíduos tóxicos são prejudiciais ou fatais quando ingeridos ou absorvidos. Quando resíduos tóxicos são dispostos no solo, pode ocorrer lixiviação e poluir a água. A toxicidade é definida através de ensaios em laboratório conforme as Normas NBR 10005, Lixiviação de Resíduos e NBR 10006, Solubilização de Resíduos, respectivamente. A partir dos ensaios são identificadas as concentrações máximas dos contaminantes no lixiviado, caracterizando como prejudiciais ou não prejudiciais a saúde humana e ao meio ambiente.

O limite máximo de concentração de alguns elementos que constam na listagem nº 7 da NBR 10004 estão na tabela 6. Os elementos que constam na tabela 6 são também, elementos que podem estar presentes em placas de circuito impresso.

**Tabela 6 – Concentração – limite máximo no extrato obtido no teste de lixiviação**

Elemento	Limite máximo no lixiviado (mg/L)	Elemento	Limite máximo no lixiviado (mg/L)
Arsênio	5,0	Cromo total	5,0
Bário	100,0	Mercúrio	0,1
Cádmio	0,5	Prata	5,0
Chumbo	5,0	Selênio	1,0

Fonte: NBR10004 – Resíduos Sólidos/1987

As propriedades químicas que normalmente caracterizam um material é a composição química. As propriedades físicas são, entre outras, a granulometria, permeabilidade, densidade, porosidade, umidade, heterogeneidade e textura.

## **2.5. Tratamento e disposição de resíduos sólidos**

Atualmente a destinação final de resíduos vem preocupando todo o mundo, não somente pela disponibilidade de espaço físico para a implantação de novos aterros sanitários, mas também devido à grande preocupação mundial quanto a preservação do meio ambiente.

No Brasil cerca de 49% do lixo coletado é disposto em vazadouros, sem qualquer tipo de tratamento. Outros 45% destinam-se a aterros controlados ou sanitários e 5% recebem tratamento em usina. Nas regiões Norte e Nordeste a parcela do lixo recolhido que é jogada em vazadouros é bem maior, em torno de 90%. Na Região Norte, dentro desses 90 %, aproximadamente 23% são jogados em áreas alagadas. Nas regiões Sudeste e Sul o quadro é menos dramático, principalmente para os municípios com mais de 300 mil habitantes, onde a maior parte do lixo coletado recebe tratamento adequado (Borsoi, 2002).

**Tabela 7 – Destino Final do Lixo (% em peso)**

Grandes Regiões	Vazadouro	Aterro			Usina		
		Controlado	Sanitário	Total	Compostagem	Reciclagem	Total
Norte	89,7	4,0	3,7	7,7	2,6	0,0	2,6
Nordeste	90,7	5,4	2,3	7,9	0,7	0,7	1,5
C. Oeste	54,0	27,0	13,1	40,1	5,0	0,3	5,9
Sudeste	26,6	24,6	40,5	65,2	4,4	3,5	8,2
Sul	40,7	52,0	4,9	57,0	1,0	1,2	2,2
Brasil	49,3	21,9	23,3	45,3	3,0	2,2	5,4

Fonte: Borsoi, 2002

Os métodos de disposição de lixo classicamente considerados são o aterro sanitário, a incineração e a compostagem. Esta conceituação se tornou ultrapassada, após o surgimento de novos métodos como a pirólise e a reciclagem, mas também por se considerar que a incineração, a compostagem e outros processos industriais devem ser mais propriamente entendidos como métodos de tratamento (Sá, Brakarz e Silva, 1987).

Estes métodos de tratamento não dispensam completamente a necessidade de áreas para a destinação final de parte dos resíduos tratados ou de rejeitos do processamento industrial, o que significa que somente a disposição no solo pode ser considerada como método completo e final de destinação de resíduos.

Os diversos métodos de tratamento têm sempre o objetivo de reduzir os custos de disposição, incluindo-se aí os custos de transporte até o sítio de destino final. Para se atingir este objetivo, diversas estratégias podem ser utilizadas.

A incineração reduz a quantidade de resíduo sólidos a ser disposto em até 90%, transformando o material sólido em efluentes gasosos, que são dispersos na atmosfera, após tratamento. Mesmo assim, restam cinzas e escória, os quais, em algumas legislações européias são consideradas resíduos perigosos e necessitam de disposição especial. No processo de incineração é possível o aproveitamento de energia, gerando calor e energia elétrica.

A compostagem, por sua vez, propicia o aproveitamento da fração orgânica existente no lixo, que é transformada em adubo orgânico, restando para disposição somente 40% do peso do resíduo que entra no processo.

Outros processos, como reciclagem, a pirólise, a Trituração, o enfardamento etc., permitem, da mesma forma, o aproveitamento de materiais e/ou energia existente nos resíduos sólidos, propiciando a percepção de receitas pela sua venda e reduzindo a quantidade de resíduo a ser disposto no solo.

#### 2.5.1. Aterro sanitário

Aterro Sanitário pode ser definido como sendo um processo para disposição de resíduos no solo, especialmente o lixo domiciliar, que utilizando normas de engenharia específicas, permite uma confinação segura, no que diz respeito ao controle da poluição ambiental e de proteção ao meio ambiente (CETESB, 1997).

Um aterro sanitário deve possuir as seguintes características:

- disposição adequada dos resíduos em conformidade com as normas de engenharia e controle ambiental;
- grande capacidade de absorção diária dos resíduos gerado;
- oferecer todas as condições para que haja a decomposição biológica da matéria orgânica contida no lixo domiciliar;

- tratamento do chorume gerado pela decomposição da matéria orgânica e das precipitações pluviométricas.

Os aterros podem ser classificados de acordo com o tipo de disposição final utilizada, como segue:

*Aterros comuns ou lixões:* os resíduos são dispostos de forma inadequada, ou seja, são jogados sobre o solo não tendo assim nenhum tipo de tratamento, é, portanto, o mais prejudicial ao meio ambiente e ao homem.

*Aterros controlados:* a disposição dos resíduos é feita da mesma maneira que nos aterros comuns, porém os resíduos são cobertos com material inerte ou terra, não existindo com tudo nenhum critério de engenharia ou controle ambiental.

*Aterros sanitários:* São aqueles que como vimos anteriormente, tem um projeto de engenharia, de controle e impacto ambiental e monitoramento.

Os aterros podem ainda ser classificados quanto ao tipo de técnica de operação:

*Aterros de superfície:* os resíduos são dispostos em uma área plana, trincheiras ou rampas.

*Aterros de depressões:* os resíduos são dispostos aproveitando as irregularidades geológicas da região, como: depressões, lagoas, mangues e ou pedreiras extintas.

A metodologia aplicada nos aterros sanitários basicamente segue a seguinte ordem:

*Levantamento de dados:* onde serão verificados os índices pluviométricos da região, que tipo de resíduos serão depositados, densidade dos resíduos, peso específico dos resíduos, etc.

*Escolha do terreno:* será levado em consideração facilidade de acesso, e recursos hídricos que deverão ser preservados, recuperação da área escolhida, etc.

*Levantamento topográfico:* é de suma importância, pois será nesse item onde será calculada a capacidade da área escolhida, ou seja, tendo-se a quantidade dos resíduos gerados diariamente e a capacidade volumétrica da área, calcula-se então o tempo de vida útil do aterro.

*Levantamento geotécnico:* nesta fase considera-se os seguintes itens: constituição do solo, permeabilidade, capacidade de carga, nível do lençol freático, jazidas de material para a cobertura e densidade do solo.

Atualmente são enviadas cerca de 13 mil toneladas/dia de resíduos para os Aterros da Prefeitura de São Paulo, sendo que apenas 0,02% deste total é reciclado, ou seja 120 toneladas/mês (Reciclagem, 2000).

#### 2.5.2. Incineração

Do ponto de vista sanitário, a destruição integral do lixo pela incineração à altas temperaturas é uma das alternativas para o destino final do lixo urbano, sendo um método de redução de volume e peso do lixo, através da combustão controlada porém, sempre haverá um resíduo a ser disposto em aterro sanitário, podendo chegar a valores em torno de 20% do peso inicial.

Um incinerador pode ser operado sem provocar agressões ao meio ambiente e para isso, deverão ser empregados precipitadores de partículas, filtros, lavadores de gases, etc. O processo de incineração atinge temperaturas acima de 900° Celsius, e no caso da queima de resíduos domiciliares haverá uma redução dos constituintes minerais como o dióxido de carbono gasoso e vapor d'água, à sólidos inorgânicos (cinzas) (Dempsey e Oppelt, 1993).

As vantagens da queima do lixo são: redução drástica do volume a ser descartado, redução do impacto ambiental, recuperação de energia, aumento da vida útil dos aterros sanitários e destoxificação. Entre as desvantagens destacamos: custo elevado de operação e

manutenção, necessidade de mão-de-obra qualificada, problemas operacionais, emissão de compostos da classe de dioxinas e furanos que são lançados na atmosfera.

No processo de incineração existem alguns componentes que devem ser levados em consideração no momento em que os resíduos são incinerados, como o poder calorífico inferior dos resíduos, a umidade e a composição das cinzas provenientes da queima dos resíduos. Estes itens interferem diretamente no rendimento do processo de incineração, pois se a umidade for elevada, necessita-se de maior energia para que haja a combustão dos resíduos. O poder calorífico nos resíduos é inversamente proporcional à energia utilizada para a combustão.

Atualmente existem incineradores que utilizam o lixo doméstico para a geração de vapor e de energia elétrica, porém para que haja maior eficiência nesse tipo de processo deverá haver uma triagem dos resíduos que serão destinados à câmara de combustão, para que se possa obter um melhor aproveitamento da energia no processo.

Podemos descrever as etapas da incineração em cinco fases distintas, contudo poderá haver uma variação quanto ao tipo de equipamento utilizado (Dempsey e Oppelt, 1993):

- a) Pré tratamento: moagem, secagem, compostagem, ensacamento;
- b) Alimentação: manual, esteira de roletes, esteira rolante, ou esteira rolante com multigarra;
- c) Incineração: câmaras múltiplas, ar controlado, forno rotativo, grelhas móveis;
- d) Condicionamento dos gases: resfriamento com água, mistura com água, trocador de calor;
- e) Tratamento dos gases: precipitador eletrostático, filtros de manga, lavadores venturi.

Atualmente os incineradores estão sendo utilizados em larga escala para incinerar os resíduos provenientes dos serviços de saúde, como hospitais, farmácias, ambulatórios, laboratórios, clínicas veterinárias e médicas.

O princípio básico da incineração é a decomposição térmica dos compostos orgânicos, por reações de quebra e oxidação a altas temperaturas (760-1550°C), em CO<sub>2</sub>, vapor d'água, NO<sub>x</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>3</sub>, SO<sub>x</sub>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ou ácidos halogenados (USEPA, 1991).

**Tabela 8 – Aplicabilidade dos principais tipos de incineradores para as várias formas físicas de resíduos**

	Injeção Líquida	Forno Rotativo	Câmara Fixa	Leito Fluidizado
<b>Sólidos</b>				
Granulares, homogêneo		X	X	X
Irregular, bruto (pellets, etc.)		X	X	
Baixo Ponto de Fusão (alcatrões, etc.)	X	X	X	X
Compostos Orgânicos com constituintes de cinza fundíveis		X	X	X
Material não preparado, volumoso, material a granel		X	X	
<b>Gases</b>				
Vapores Orgânicos	X	X	X	X
<b>Líquidos</b>				
Resíduos Aquosos com alta carga de orgânicos	X	X	X	X
Líquidos Orgânicos	X	X	X	X
<b>Sólidos/Líquidos</b>				
Resíduo contendo compostos aromáticos halogenados (mínimo de 1204°C)	X	X	X	
Lodo aquoso orgânico			X	X

Fonte : Dempsey e Oppelt, 1993

Na incineração de injeção líquida os constituintes orgânicos do resíduo são volatilizados e as ligações químicas são desestabilizadas. Uma vez que as ligações químicas são quebradas, os constituintes reagem com O<sub>2</sub> para formar CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>(v)</sub> e outros compostos.

Na incineração de forno rotativo e câmara fixa há duas câmaras envolvidas no processo. Na primeira câmara os constituintes orgânicos são volatilizados, e durante esse processo muito dos constituintes orgânicos se oxidam e se transformam em CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O<sub>(v)</sub>. Na segunda câmara as ligações

químicas são desestabilizadas, e os constituintes orgânicos reagem com O<sub>2</sub> para formar CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>(v)</sub> e outros compostos.

Na incineração de leito fluidizado uma única câmara contém o recheio (areia) fluidizado e uma seção livre acima desse recheio. O leito fluidizado auxilia a volatilização e a combustão dos constituintes orgânicos do resíduo. A área do leito fornece capacidade calorífica suficiente para volatilização e o ar usado na fluidização fornece O<sub>2</sub> e turbulência para que ocorram as reações já citadas. O tempo adicional para conversão total dos constituintes orgânicos é obtido na seção livre acima do leito (Theodore e Reynolds, 1987).

#### 2.5.3. Pirólise

O processo de pirólise pode ser genericamente definido como sendo o de decomposição química por calor na ausência de oxigênio.

Os resíduos que alimentam o reator pirolítico podem ser provenientes do lixo doméstico, do processamento de plásticos e resíduos industriais. O processo consiste da Trituração destes resíduos que deverão ser previamente selecionados, após esta etapa serão destinados ao reator pirolítico onde através de uma reação endotérmica ocorrerão as separações dos subprodutos em cada etapa do processo (Kompac, 2001).

Através da pirólise a matéria orgânica pode ser convertida em diversos sub-produtos. O material pirolisado pode ser dividido em três grupos:

- a) gases, compostos por hidrogênio, metano e monóxido de carbono;
- b) combustível líquido, composto por hidrocarbonetos, alcoóis e ácidos orgânicos de elevada densidade e baixo teor de enxofre;
- c) um resíduo sólido, constituído por carbono quase puro (char) e ainda, por vidros, metais e outros materiais inertes (escória).

O reator pirolítico possui três zonas específicas :

- zona de secagem: onde os resíduos que irão alimentar o reator passam por duas etapas a pré-secagem e a secagem propriamente dita, nesta zona as temperaturas estão na ordem dos 100° a 150° C ( vale lembrar que esta etapa é de suma importância, pois a umidade pode interagir negativamente com os resultados do processo);
- zona de pirólise: onde ocorrerão as reações propriamente ditas, sendo elas a volatização, oxidação e a fusão, as temperaturas nesta fase variam de 150° a 1600° C, é onde são coletados os produtos (alcoóis, óleo combustível, alcatrão, etc);
- zona de resfriamento: nesta fase os resíduos gerados pelo processo são coletados no final do processo (char, cinzas e escória) e removidas pela parte inferior do sistema.

Diferindo do processo de combustão realizado em condições exotérmicas, a pirólise é um processo de reação endotérmica, e esta condição de contorno se faz necessária, pois somente desta forma, reduzindo as perdas de calor, é possível obter o fracionamento das substâncias sólidas presentes no lixo.

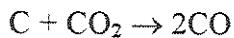
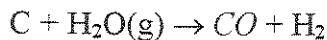
O balanço energético do sistema de pirólise é normalmente positivo, pois produz mais energia do que consome; este, sem dúvida, é um fator importante para que este processo continue a ser pesquisado.

Embora do ponto de vista energético e ecológico os sistemas de pirólise apresentem acentuadas vantagens sobre os demais sistemas de tratamento de resíduos, alguns inconvenientes têm limitado o emprego da pirólise em larga escala.

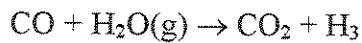
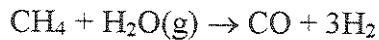
Mallan e Finney (1972) citam três parâmetros críticos que possibilitaram a limitação deste processo: teor de sólidos voláteis presentes no lixo, poder calorífico superior e umidade. A variação estatística destes fatores dificulta o controle do processo, reduzindo sobremaneira sua eficiência.

McFaland *et al.* (1972) estudando os efeitos da temperatura no processo de pirolise enumeraram uma série de importantes observações:

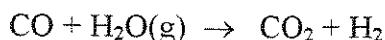
- a) O teor de carbono residual diminui com o aumento da temperatura devido à conversão do carbono em gases combustíveis, segundo as equações:



- b) O total de água presente diminui com o aumento da temperatura devido à reação de dissociação de metano:



- c) Os condensados orgânicos diminuem com a temperatura devido às reações de cracking, que resulta na formação de produtos orgânicos de baixo peso molecular. Em altas temperaturas estes produtos são convertidos em  $H_2$ , CO e  $CH_4$ .
- d) A produção de gás aumenta com a temperatura. O pico da produção de etano, etileno e metano ocorre a 650 °C, 800 °C e 900 °C respectivamente.
- e) A produção de dióxido de carbono aumenta a 900 °C. Entretanto, acima de 800 °C ocorre a conversão de  $CO_2$  para CO devido à alta concentração de hidrogênio, baixa concentração de água e pelo coeficiente de temperatura negativo da reação



A Pirólise é um processo que leva vantagem sobre todos os outros conhecidos ou desenvolvidos até hoje, como a incineração e compostagem, porém ela não pode substituir os aterros sanitários, mas pode diminuir em muito o volume de resíduos enviados para os aterros sanitários, que tem pela sua grandiosidade de projeto um elevado custo operacional. Entretanto se pudesse ser

conciliados os dois tipos de tratamento de resíduos com certeza estaria solucionado o problema do impacto ambiental que as atividades humanas geram atualmente.

#### 2.5.4. Compostagem

Compostagem é um processo biológico de decomposição aeróbia de matéria orgânica que pode estar contido em restos de origem animal ou vegetal. O produto final resultante do processo de compostagem pode ser considerado como um enriquecedor do solo, ou seja ele poderá ser aplicado ao solo para melhorar a suas características, sem que haja uma contaminação do meio ambiente (Baere, 2000).

Neste processo o Biogestor representa o coração de uma Usina, pois é nele que se inicia o processo de fermentação da fração orgânica contida no lixo domiciliar. Os índices de frações orgânicas contidas no lixo doméstico brasileiro varia de 60% até 75% do seu total em peso (Brummeler, Aarnink e Koster, 1992).

Entre as vantagens da compostagem podemos destacar, economia de espaço físico em aterro sanitário, aproveitamento agrícola da matéria orgânica produzida, reciclagem dos nutrientes contidos no solo, eliminação de patogênicos e baixo impacto ambiental.

O processo de compostagem pode ocorrer de duas maneiras:

- a) Método natural: onde a fração orgânica do lixo é levada para um pátio e disposta em leiras. A aeração é feita por revolvimentos periódicos para o desenvolvimento do processo de decomposição e biológica, este processo tem um tempo estimado que pode variar de três a quatro meses;

b) Método acelerado: a aeração é迫使 por tubulações perfuradas, sobre as quais se colocam as leiras, ou em reatores dentro dos quais são colocados os resíduos, avançando no sentido contrário ao da corrente de ar. Este processo pode durar de dois a três meses.

O grau de decomposição ou de degradação do material submetido ao processo de compostagem é acompanhado levando-se em consideração três fatores: cor, umidade e odor. A cor inicial tem um tom marrom e a final é preta, no início do processo a umidade é elevada e o odor é ocre passando para o de terra mofada no final do processo.

Existem alguns fatores que devem ser observados durante o processo de compostagem da fração orgânica:

Aeração: é necessária para que a atividade biológica entrar em ação, possibilitando a decomposição da matéria orgânica de forma mais rápida.

Temperatura: o processo se inicia à temperatura ambiente, mas com passar do tempo e à medida que a ação microbiana se intensifica a temperatura se eleva, podendo atingir valores acima de 60 ° Celsius. Esta fase do processo é chamada de termófila e é importante para a eliminação dos micróbios patogênicos e sementes de ervas daninhas. Depois que a temperatura atinge este pico inicia-se um processo de abaixamento da temperatura chegando à temperaturas próximas de 30 ° Celsius e nesta fase em que ocorre a bioestabilização da matéria orgânica.

Umidade: ou teor de umidade dos resíduos depende da granulometria da fração orgânica, bem como da porosidade e grau de compactação da mesma. Para que haja uma compostagem satisfatória a umidade não deve exceder o máximo de 50% em peso, durante o processo. Se houver uma diminuição da umidade a atividade biológica será reduzida. Por outro lado, se for muito elevada a geração biológica será prejudicada, ocorrendo anaerobiose. Sob estas condições forma-se o chorume, que é um líquido negro, de odor ocre. Se o local onde está sendo feita a compostagem for desprotegido, o material estará sujeito às ações da chuva, o que aumentará em demasiado a produção de chorume.

**Granulometria:** é um fator que deve ser levado em consideração para que se inicie o processo de compostagem da fração orgânica. As partículas podem atingir valores máximos de 5,0 a 1,2 cm de diâmetro. Para a fração orgânica atingir esses valores, deverão ser utilizadas peneiras.

#### 2.5.5. Minimização de Resíduos

A minimização da geração de resíduos se constitui numa estratégia importante no gerenciamento de resíduos e se baseia na adoção de técnicas que possibilitem a redução do volume e/ou toxicidade dos resíduos e, consequentemente, de sua carga poluidora (Rocca, 1992).

As práticas de minimização de resíduos têm-se mostrado economicamente vantajosas já que oferecem uma possibilidade de redução de custos associada ao tratamento destes resíduos ou associados à venda de subprodutos e de resíduos tratados, ou à sua reutilização no processo.

As ações de minimização são, normalmente de dois tipos:

- Atividades de caráter organizacional, tais como treinamento de pessoal e manutenção;
- Alterações de caráter técnico.

Na Alemanha e nos Estados Unidos o procedimento de minimização de resíduos vem sendo adotado como linha de ação prioritária do governo de alguns estados, tendo em vista incentivar a pesquisa de novas metodologias que se mostrem ambientalmente vantajosas.

Existem basicamente duas estratégias para minimização de resíduos: redução na fonte e reciclagem.

### ***Redução na fonte***

A redução na fonte consiste na redução ou eliminação da geração de um resíduo de processo através de modificações dentro do processo, que se dividem nos seguintes tipos:

- Substituição e purificação de matérias-primas ou produtos auxiliares.
- Alterações de tecnologias: mudança no processo ou no arranjo dos equipamentos e tubulações; automatização; mudança nas condições operacionais; redução no consumo de água e energia; etc.
- Mudança de procedimentos e práticas operacionais: prevenção de perdas, treinamento de pessoal e segregação.

### ***Reciclagem***

A reciclagem, através do reuso ou recuperação de resíduos ou de seus constituintes que apresentam algum valor econômico é uma das formas mais atraentes de solucionar os problemas de gerenciamento de resíduos, tanto do ponto de vista empresarial como dos órgãos públicos de proteção ambiental. A reciclagem pode ocorrer por recuperação de matéria-prima, produto final, sub-produto, energia e embalagem.

Do ponto de vista empresarial, a reciclagem torna-se interessante, pois o correto transporte, tratamento e disposição final de resíduos apresenta, um custo bastante elevado. Assim, o reaproveitamento ou a venda destes resíduos pode se tornar numa fonte de renda adicional para seu gerador ou reduzir os custos de produção.

Do ponto de vista dos órgãos de controle, essa prática é muito conveniente, pois diminui a quantidade de resíduos lançados no meio ambiente, além de contribuir para a preservação dos recursos naturais. Em muitos países, uma série de resíduos devem ser obrigatoriamente recuperados.

Em termos práticos, um resíduo só será recuperado se o seu custo puder ser menor ou igual ao preço de mercado, ou então, se for mais barato recuperá-lo do que transportá-lo e tratá-lo ou dispô-lo adequadamente.

Para incentivar as atividades de reciclagem, têm sido criados em muitos países, inclusive no Brasil, sistemas de troca de informações através de uma publicação denominada “Bolsa de Resíduos”, onde se pode comprar, vender ou solicitar diversos tipos de resíduo. No Brasil, este sistema ainda não se encontra efetivamente implementado.

#### 2.5.6. Redução Mecânica

A redução mecânica de tamanho é um termo geral que abrange dois grandes processos de tratamento de resíduo. O primeiro é chamado de trituração ou moagem e o segundo, de compressão ou enfardamento. Em ambos os casos obtém-se uma redução do volume de resíduo (Sá, Brakarz e Silva, 1987).

##### *Trituração*

A trituração pode ser de dois tipos: a seco ou por via úmida. Na trituração a seco o equipamento mais comumente usado é o moinho. Conforme o fabricante, é caracterizado pela posição horizontal ou vertical do seu eixo rotativo central. Existem vários tipos de moinhos usados na trituração a seco de resíduos, como o modelo que utiliza engrenagens para moer o material, o que emprega facas para ciscar o resíduo e o que tritura por impacto.

A trituração por via úmida emprega o equipamento conhecido como “hydropulper”. Este processo teve a sua origem nas indústrias de papel. O resíduo é lançado pela parte superior no interior de um tanque, ao qual é adicionada água. Na base deste tanque existe um eixo vertical, com movimento giratório, em cuja extremidade encontra-se uma hélice. O revolvimento da massa líquida propicia, pela parte média do tanque, a eliminação de materiais rejeitáveis. O resíduo fragmentado é eliminado pela parte inferior.

## **Prensagem**

Existem diversos processos de prensagem do lixo, mas todos empregam um compactador para a redução de volume do material solto, sendo a pressão exercida pela placa de compactação da ordem de 2,5 kg/m<sup>2</sup> a 200 kg/m<sup>2</sup>.

Quando a compactação transforma o lixo em fardos, estes são utilizados nos aterros sanitários, com os benefícios de receberem maiores quantidades de material; exigirem menores quantidades de terra de cobertura; e facilitarem um aterro com boa compactação de base.

## **2.6. Resíduos sólidos e a questão ambiental**

Segundo Balderrama (1993), impacto ambiental é definido como qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que direta ou indiretamente afetam:

- I – a saúde, a segurança e o bem estar da população;
- II – as atividades sociais e econômicas;
- III – os animais e vegetais de uma região;
- IV – as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;
- V – a qualidade dos recursos ambientais.

Para identificação e análise de impactos ambientais são utilizados os seguintes conceitos apresentados por Higesa (2000):

- Etapa de Ocorrência dos Impactos – Identifica quais as etapas onde ocorrerão os impactos durante o desenvolvimento do empreendimento (planejamento e projeto, implantação, operação e encerramento).
- Fator Ambiental Afetado – Identifica em qual(is) meio(os) ambiental(is) incidirão os impactos (meio físico, biótico e sócio-econômico).

- Extensão – Estima a abrangência geográfica de ocorrência dos impactos (locais, regionais e nacionais).
- Natureza – Trata da dinâmica de ocorrência dos impactos (diretos e indiretos).
- Efeito – Julgamento de valor qualitativo sobre uma alteração das condições ambientais por um impacto (positivo ou negativo).
- Magnitude – Dimensão ou intensidade de um impacto. Implica em uma avaliação quantitativa do impacto (alta, média, baixa ou desprezíveis).
- Reversibilidade – Características relativa ao retorno ou não das alterações ambientais às suas condições originais, uma vez cessada a ação que o causou.
- Horizonte temporal de incidência – Intervalo de tempo decorrente entre o início da implantação ou adoção da ação e ocorrência dos impactos ambientais associados.
- Periodicidade – Características relativa à dinâmica temporal de ocorrência dos impactos.
- Probabilidade de ocorrência – Avaliação da probabilidade de ocorrência do impacto (alta, média, pequena)

Todavia o desenvolvimento tecnológico forneceu ao homem o conhecimento e as técnicas para intervir na proteção ambiental: deste modo são entendidas todas as iniciativas voltadas a garantir um tratamento adequado dos resíduos.

O crescente desenvolvimento de tecnologias de tratamento de resíduos , como aterros sanitários, incineradores e outros são um exemplo evidente das afirmações anteriores (Gandolla e Dugnani, 1990). Estas técnicas objetivam evitar as consequências danosas do ponto de vista ambiental e sanitário que a disposição inadequada do lixo pode causar.

A questão dos resíduos sólidos prende-se basicamente ao fato de que a produção de resíduos tem sido maior que a capacidade de assimilação da natureza.

Nos primórdios da nossa civilização o homem, como os outros seres vivos, convivia e submetia-se às leis da natureza. Os resíduos produzidos neste período eram, sobretudo, excrementos e biomassa morta. Os materiais utilizados nas diversas atividades eram substancialmente de origem natural e o ambiente não tinha maiores dificuldades em reabsorvê-los. Além disto, uma vez que a

população mundial e as concentrações das substâncias eram pequenas, não existiam problemas específicos com cargas pontuais excessivas, como por exemplo, nos grandes centros.

Com a revolução industrial no século XIX, tem início a produção de bens de consumo em larga escala e o crescimento acelerado da população, alterando o equilíbrio dos ciclos naturais de decomposição e reciclagem da matéria orgânica devido à maior quantidade de resíduos gerados e especialmente à qualidade destes, com o surgimento dos resíduos inorgânicos, não biodegradáveis e os orgânicos de difícil decomposição, levando anos para biodegradação, a exemplo dos plásticos, solventes, pesticidas, entre outros.

Os resíduos sólidos produzidos diariamente quando dispostos de forma inadequada, podem trazer consequências graves para o ambiente e a saúde da população. Provocam a poluição do solo, da água superficial e subterrânea e do ar, através de processos naturais, como a biodigestão de resíduos (Lopes et. Al., 2000).

Quanto aos aspectos epidemiológicos, Carvalho (1980) afirma que o lixo pode se transformar em uma perigosa peça da estrutura epidemiológica de um aglomerado humano.

Diversos autores consideram resíduos como um dos determinantes da estrutura epidemiológica da comunidade, exercendo sua ação sobre a incidência das doenças ao lado de outros fatores. Contudo, do ponto de vista sanitário a importância do resíduo como causa direta não está comprovada. Porém, como fator indireto tem grande importância na transmissão de doenças.

Machado e Prata Filho (1999), propõe um esquema das vias de contato lixo-homem, que, resumidamente explica as trajetórias pelas quais pode ocorrer a transmissão de doenças oriundas da disposição inadequada dos resíduos sólidos urbanos. Em função da diversidade de vias e, especialmente, a ação dos vetores biológicos e mecânicos, o raio de influência e os agravos sobre a saúde mostram-se de difícil identificação.

Tchobanoglous, Theisen e Vigil (1993), consideram evidente a relação entre saúde pública e as operações de acondicionamento, coleta e disposição de resíduos sólidos. Machado e Prata Filho (1999),

mostram ainda que autoridades sanitárias americanas verificaram relações entre vinte e dois tipos de doenças e o manuseio inadequado de resíduos sólidos.

A principal meta a alcançar com um correto manejo dos resíduos sólidos urbanos é a proteção da saúde humana e ambiental, reduzindo os impactos ambientais.

De acordo com a Agenda 21, para garantir o desenvolvimento sustentável é fundamental a modificação nas relações de produção e consumo, com o manejo ambientalmente saudável dos resíduos, buscando apoiar-se em: redução na origem, aumento da reutilização e reciclagem, promoção do depósito e tratamento e ampliação do alcance dos serviços de limpeza urbana (Teixeira, 2000).

Após a realização da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio ambiente e Desenvolvimento, oficializou-se a política de busca de minimização do resíduo sólido e consequentemente da utilização do conceito de gerenciamento integrado (Teixeira, 2000).

Gandolla e Dugnani (1990), ao discutirem as relações entre ambiente, produção de bens de consumo e resíduos, avaliam que a sociedade moderna é caracterizada por uma procura crescente de extração das matérias primas de jazidas naturais para a produção de bens de consumo. Estes bens, uma vez consumidos nas diversas atividades humanas, são definidos como resto ou refugo. Se o refugo é técnica e economicamente reutilizável é possível e desejável sua reutilização ou reciclagem, se este não for o caso o rejeito tornar-se-á de fato um resíduo e como tal deverá ter processamento ou manejo adequado.

Analizando o ciclo da matéria e definindo como processamento de resíduos a operação de coleta, armazenamento, tratamento e retorno ao ambiente do material que não possa mais ser reciclado, é particularmente importante que o retorno ao ambiente ocorra com o menor impacto possível.

Esta operação, ainda segundo Gandolla e Dugnani (1990), é de especial importância para a defesa do ar, água e solo, e é composta essencialmente de três fases:

1. Transformação do resíduo em uma forma fisico-química que seja ao mesmo tempo mais estável e ambientalmente o mais neutra possível;
2. Disposição final em aterro sanitário dos restos das transformações sólidas ou solidificadas, que não são nem recicláveis nem ambientalmente neutros;
3. Dissipação no ambiente dos restos dos tratamentos que são simultaneamente não recicláveis e ambientalmente neutros.

É óbvio que todos os bens utilizados pelo homem nas suas atividades provêm, direta ou indiretamente do ambiente. Todos esses bens cedo ou tarde, retornam ao ambiente passando de jazidas naturais a jazidas artificiais (aterros); o que conta é que sua reinserção ocorra com o menor impacto possível.

Percebe-se deste modo os conceitos básicos do processamento dos resíduos, evidenciando as inter-relações entre produção, processamento e retorno ao ambiente de seus derivados. Assim o manejo sustentável dos resíduos pressupõe a busca da minimização, seguida pela organização da coleta, transporte, tratamento e/ou destino final do que de fato não possa ser reutilizado ou reciclado.

Estas atividades têm caráter de medidas de saneamento e objetivam eliminar os impactos negativos decorrentes do manejo inadequado dos resíduos.

## **2.7. Resíduos sólidos de produtos eletrônicos**

Atualmente o setor de equipamentos eletro-eletrônicos é um dos que mais cresce no mundo. As inovações tecnológicas e a expansão do mercado no mundo globalizado, tem acelerado drasticamente o setor eletro-eletrônico. Novas aplicações envolvendo esses equipamentos vem crescendo significativamente. Este grande desenvolvimento consequentemente conduz a um aumento na geração de resíduos de equipamentos eletro-eletrônicos. Podemos citar os primeiros computadores que possuíam uma utilização de 10 anos, e atualmente este período é de 2 a 4,3 anos para produtos mais inovadores.

Os resíduos de equipamentos de informática são uma complexa mistura de materiais e componentes que em combinação com o constante desenvolvimento de novos materiais e produtos químicos, vem originando vários estudos sobre seus impactos ambientais (Ceolato, 2000).

**Tabela 9 – Materiais de computadores que serão descartados até 2004\***

Plástico	2 milhões
Chumbo	600 mil
Cádmio	Mil
Cromo	600
Mercúrio	200

\* Previsão em toneladas

Fonte: MCC (Microelectronics and Computer Technology Corporation), 2000

**Tabela 10 – Materiais presentes nos computadores (em relação ao peso total)**

Plástico	40%
Metais	37%
Dispositivos eletrônicos	5%
Borracha	1%
Outros	17%
<b>Materiais recuperáveis</b>	<b>94%</b>

Fonte: Geodis Logistics, 2000

Segundo o Anuário de Informática Hoje (2001), nos últimos 15 anos, a indústria brasileira de informática deu um salto para o futuro. Foi-se o tempo dos ATs e XTs, de 8 e 16 bits, produzidos, no país, em pequena escala, por vários fabricantes nacionais. Os microcomputadores de hoje são máquinas poderosas, com altas velocidades de processamento, fabricadas em grandes quantidades, e que entraram no dia a dia das empresas e das pessoas, podendo proporcionar maior poder de competição no mercado e democratizar o acesso dos usuários às informações.

A trajetória da indústria de informática instalada no Brasil, na mudança de um cenário para outro, é relatada pelo Anuário de Informática Hoje. Com base em análises técnicas do desempenho econômico-financeiro de cerca de 250 empresas, o Anuário registrou uma escalada brutal da receita proveniente dos negócios de Tecnologia da Informação (TI) no país, nos últimos quinze anos. Segundo essas análises, as vendas das empresas estabelecidas no país passaram de US\$ 14,7 bilhões em 98, com

visão de chegar a US\$ 16,9 bilhões em 99. De 94 a 98, por exemplo, a indústria experimentou um crescimento anual da ordem de 18,6%.

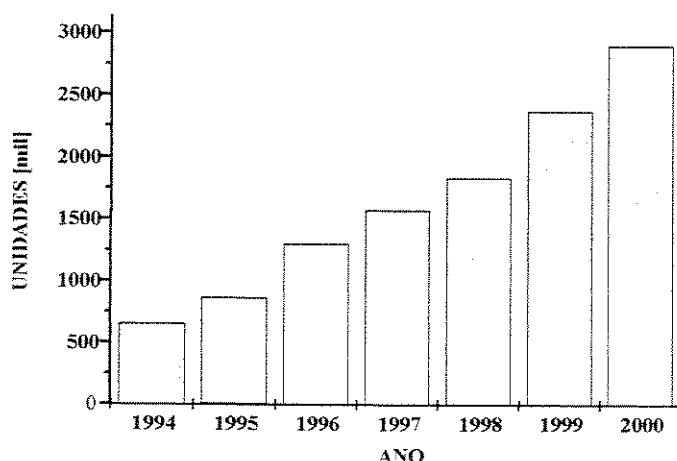
Segundo a Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica – ABINEE (2001) a evolução do nível de utilização da capacidade produtiva, a partir de 1999, demonstrou o período favorável pelo qual estava passando o setor.

**Tabela 11- Indicadores Econômicos**

<b>Setor de Informática</b>	<b>1999</b>	<b>2000</b>
Faturamento (em R\$ milhões)	10.588	12.811
Exportações (US\$ milhões)	323	346
Importações (US\$ milhões)	855	1.079

Fonte: ABINEE, 2000

O mercado de computadores vem obtendo um desempenho espantoso no Brasil. Havia mais de 80 fabricantes locais, nos primórdios da reserva de mercado, com uma base instalada que não passava de 13,5 mil máquinas, em 1985. Após 15 anos, o parque instalado segundo registro do Anuário Informática Hoje (2001), beirou 8 milhões de máquinas e não há mais do que 12 marcas famosas produzindo e comercializando computadores no mercado brasileiro; cerca de 190 mil equipamentos saem das linhas de montagem por mês e as vendas anuais atingiram 2,8 milhões de unidades, no ano 2000.



**Figura 1 – Evolução das Vendas**

O crescente aumento no consumo de microcomputadores e consequentemente no volume de produção, tende a agravar os problemas de disposição adequada desses equipamentos caso mudanças e adoções de condutas não sejam tomadas no presente.

#### 2.7.1. Placas de circuito impresso

A Placa de circuito impresso é um componente básico, largamente utilizado em toda a indústria eletrônica, principalmente a indústria de informática, sendo constituída por uma placa (ou cartão) onde são impressas ou depositadas trilhas de cobre. Enquanto a placa se comporta como um isolante (dielétrico), as trilhas têm a função de conectar eletricamente os diversos componentes e as funções que representam.

A placa de circuito impresso tanto constitui laminado mecânico para os componentes eletrônicos que formam o circuito (resistores, capacitores, circuitos integrados, transistores, diodos e componentes magnéticos) como viabiliza, devido às trilhas de cobre, o contato elétrico entre esses elementos (ABRACI, 2001).

Inicialmente, fabricavam-se somente placas de simples face, em que as trilhas de cobre ficavam localizadas sobre um dos lados da placa, sendo os componentes montados sobre o outro. Para estabelecer o contato trilha-componente, os terminais dos componentes passavam por furos efetuados nas placas, sendo a seguir realizada a soldagem, que fazia a junção elétrica entre as duas partes.

Uma das formas de classificar as placas de circuito impresso leva em conta o material que as constitui, que a indústria costuma designar como “laminado”.

Quando a base do laminado é um aglomerado de papel e resina fenólica (circuitos convencionais), utiliza-se a nomenclatura FR-2 e, em função de seus limites quanto à resistência mecânica, o mesmo somente se presta à montagem em simples face. O principal cliente desse tipo de placa de circuito impresso é a indústria de aparelhos de televisão, sendo ainda bastante utilizado em

aparelhos eletrônicos de consumo e eletrodomésticos de maneira geral, como, por exemplo, sistemas de som, receptores de sinais abertos de TV via satélite, jogos eletrônicos, máquinas de lavar roupa etc.

Outra classe de placa é a denominada FR-4, na qual o laminado é de fibra de vidro, material mais resistente do que aquele usado na FR-2 (circuitos profissionais), sendo assim encontrado também nas configurações de dupla face e multilayer. Em razão desse atributo, encontra aplicação em setores que necessitam de especificações mais rígidas, tais como informática, telecomunicações, controles industriais, automatização bancária, automatização comercial, entre outros.

Convém observar que existe outro tipo de laminado, genericamente designado CEM-x, constituído por um material composto de papel, resina e fibra de vidro, que pode ser entendido como um tipo intermediário entre a FR-2 e a FR-4. Inicialmente, havia apenas a configuração CEM-1, de simples face, concebida para atender aos requisitos de resistência a elevadas temperaturas e a grandes amplitudes térmicas requeridos pela indústria automotiva (eletrônica embarcada). Mais tarde, foi desenvolvida a classe CEM-3, que difere da anterior pela utilização de jumpers (“conectores”) ou conectores de prata, que possibilitam contato elétrico mais eficiente entre os componentes eletrônicos do circuito.

Quanto às trilhas, existem as seguintes possibilidades de laminado: FR-4, FR-5 (o modelo convencional é substituído por material cerâmico), poliimida, aramida e teflon. Essas configurações, com exceção da FR-4, são exclusivas para microvias. No caso das placas de circuito impresso flexíveis, o laminado pode ser do tipo poliimida ou poliéster.

#### 2.7.2. Processos de fabricação

Os processos de fabricação de placas de circuito impresso evoluíram de forma acelerada nos últimos anos, com o intuito de acompanhar o crescente aumento da densidade de componentes, a diminuição das cápsulas, o aumento das frequências de operação e a necessidade de um número cada vez maior de camadas, além da maior rapidez exigida pelas empresas consumidoras. Partindo de placas com apenas uma face impressa, onde as trilhas com vários milímetros de largura e pinos não menores

que 1 mm eram desenhados manualmente num ritmo extremamente lento, atualmente é possível a fabricação de placas com dezenas de camadas de fiação impressa, com furos cada vez mais diminutos, passando de décimos para centésimos de milímetro com as novas tecnologias a laser, sendo em casos extremos os protótipos fabricados em poucas horas a partir do recebimento os dados do projetista (Kugler, 2002).

Existem dois métodos básicos para a fabricação de placas de circuito impresso: processo subtrativo e processo aditivo, além de outros menos eficientes e/ou menos populares (ABRACI, 2001).

O processo mais utilizado para a obtenção de uma placa de circuito impresso, conhecido como “subtrativo”, é o processo mais difundido atualmente, obtendo a maior precisão de traçado em relação a todos os outros. Pode ser aplicado a qualquer número de camadas, sendo que a placa é constituída, na realidade, de um conjunto de várias placas de dupla-face e mais duas placas de face simples externas. Neste processo, as placas são fabricadas em um painel, que é uma grande placa que contém várias vezes o traçado desejado, para a otimização de tempo e dos banhos. As etapas do processo de fabricação são descritas a seguir:

*Prensagem das camadas:* o processo se inicia com a confecção das camadas internas, cada dupla-face interna separadamente, sendo a espessura de cada camada determinada pelo número total de camadas. Dependendo da espessura, pode-se utilizar laminados já prontos, ou pode-se fazer o laminado, prensando-se as lâminas de cobre e as lâminas de resina (prepregs) no número certo para a espessura desejada. Os prepregs são folhas de resina (de consistência semelhante a uma estopa) que se torna aderente sob o calor. Estas folhas de resina têm uma orientação correta das fibras que deve ser respeitada para se evitar a formação de bolhas durante o processo de aquecimento e prensagem;

*Adição dos furos posicionadores:* com os laminados prontos, são feitos os furos posicionadores, que serão essenciais para a calibração das coordenadas dos painéis nas demais etapas, quando todos os painéis de cada camada interna são reunidos numa placa única. Estes furos são adicionados fora da área útil das placas;

**Banho desengraxante:** a placa então passa por um banho desengraxante, para a eliminação de gorduras e impurezas na superfície de cobre, e ao mesmo tempo para torná-la áspera para ser possível a adesão do filme fotossensível, o qual é colocado na placa de modo similar a uma plastificação, sempre sob luz amarela (devido à alta sensibilidade do filme);

**Sensibilização e revelação do traçado:** a seguir, são colocados os dois fotolitos (fabricados anteriormente sob o processo já descrito) correspondentes a esta placa dupla-face interna, orientados pelos furos posicionadores. A placa então é exposta a luz branca, para a sensibilização do filme, o qual então passa por todo o processo convencional de revelação: aplicação de revelador, banho de limpeza, aplicação de fixador, novo banho de limpeza, aplicação de limpador e secagem final. Este processo é, atualmente, automatizado por máquinas processadoras semelhantes às máquinas de revelação rápida de fotografias;

**Primeira decapagem:** a placa está, então, pronta para a primeira decapagem, na qual é retirada a camada de filme sobre as trilhas e ilhas;

**Deposição de Sn/Pb:** é necessária uma deposição de liga Estanho/Chumbo sobre as trilhas, para o isolamento das mesmas ao processo de corrosão, ao qual a camada de filme não resistiria;

**Segunda decapagem:** realiza-se então a segunda decapagem, para a retirada do restante do filme fotossensível, para a exposição da área de cobre a ser retirada no processo de corrosão química;

**Corrosão:** esta fase dá o nome ao método subtrativo. Nela, a placa passa por uma câmara fechada e isolada, onde a placa recebe de ambos os lados, jatos de amônia líquida, altamente nociva e corrosiva. Finalmente, têm-se apenas as trilhas de cobre sobre a placa, a qual passa, então, por um banho de limpeza (com água), para a retirada da sobra de amônia. Para que este processo se realize com sucesso, a placa deve apresentar o que se chama de compatibilidade galvânica, ou seja, não pode apresentar diferenças de densidades de trilha muito significativas ao longo da placa. Caso uma região da placa não possua trilhas, e a camada de cobre fique totalmente retirada desta área, haverá um grande consumo de íons da substância corrosiva, o que irá exigir mais tempo de corrosão, provocando o estreitamento das trilhas nas áreas mais densas. O caso inverso também se verifica. Caso o projetista

não tenha tomado este cuidado, a própria fábrica aplica algum padrão de preenchimento (normalmente um padrão quadriculado) na devida área para uniformizar a densidade de trilhas. Porém, isto gera atrasos na fabricação;

**Decapagem de Sn/Pb:** é retirada a camada de estanho/chumbo, também por processo químico;

**Deposição de Cu:** esta deposição é necessária para a homogeneização da camada de cobre, a qual, além do banho inicial que a tornou áspera, sofreu perdas de cobre ao longo dos banhos que recebeu. Com a eletrodeposição química de cobre, é garantida a espessura de cobre desejada (normalmente 0.5 ou 1 onça de Cu).

**Montagem das camadas:** as camadas são montadas umas sobre as outras, e externamente são montadas duas placas de face simples. Todos estes laminados são intercalados por prepregs e orientados pelos furos posicionadores, sendo então comprimidas em prensas até a espessura correta. A placa, a partir de agora, é tratada como uma placa dupla face simples;

**Furação:** como a placa agora é tratada como uma dupla face tradicional, é possível adicionar os furos não-metralizados relativos ao traçado. Na furação, são processados três painéis de cada vez, sendo possível até nove, o que não é feito por provocar um rápido desgaste das brocas. Os painéis são montados pelos furos posicionadores e prensados numa estrutura que por baixo tem uma placa de fenolite de 3 a 5 centímetros e por cima uma placa de alumínio. Essas placas servem para evitar a formação de rebarbas no processo de furação, sendo que a broca atravessa todas as camadas (alumínio e os painéis) até encontrar o fenolite. O alumínio serve ainda para refrigerar a broca. As máquinas de furação realizam testes das brocas constantemente, avaliando comprimento, diâmetro e afiação. Quando a afiação de uma broca sai do padrão, ela é substituída por outra e vai para a afiação automática feita pela própria máquina. Quando a broca sai dos padrões de diâmetro e/ou comprimento, ela é descartada. Normalmente, as grandes fábricas trabalham com várias furadeiras automáticas simultaneamente;

**Metalização dos furos:** é feita com a deposição eletroquímica de cobre. Como a adição de cobre diminui o diâmetro dos furos, estes devem ser feitos com diâmetro maior, para haver uma

compensação. Esta metalização é feita com uma corrente bastante alta, o que provoca uma deposição irregular nas faces da placa;

**Deposição na superfície:** para se uniformizar a superfície do cobre, é realizada uma nova deposição, desta vez com uma corrente bem mais baixa. É necessário se manter áspera a superfície para a fixação do fotolito. Repetem-se então todos os passos descritos para a confecção das camadas de dupla face internas, quais sejam: laminação, exposição, revelação, decapagem, deposição de Sn/Pb, nova decapagem, corrosão, decapagem de Sn/Pb e deposição de Cu;

**Aplicação da máscara de solda:** a aplicação do verniz de máscara de solda também se dá por processo fotográfico, sob luz amarela. Porém, o próprio verniz é fotossensível, sendo inicialmente aplicado sobre toda a placa, por um processo de cortina (ou cascata) de tinta. Os fotolitos da máscara de solda são posicionados, a placa é sensibilizada e depois revelada por processo manual, com a aplicação de reveladores, fixadores, limpadores e secagem.

**Deposição de Sn/Pb nos furos:** já com a máscara de solda pronta, é necessária a deposição de estanho/chumbo nos furos de passagens e pads de componentes (tanto SMD como convencionais). Para isso, a placa passa por um processo chamado de “Hot Air Leaving”, que consiste em se mergulhar a placa em uma cuba com a liga de estanho/chumbo derretida. A placa permanece apenas alguns instantes nesta cuba, sendo que, quando é suspensa, nela são aplicados dois jatos de ar quente de altura defasada, um de cada lado, que retiram o excesso de estanho/chumbo da placa e desentopem os furos;

**Teste ótico:** os painéis são testados nos quesitos de espessura dos laminados, espessura e espaçamento das trilhas por um processo ótico através de um scanner, o qual amplia a área onde for encontrada uma não conformidade das especificações;

**Adição dos furos não-metalizados:** caso o painel seja aprovado nos testes óticos, são realizados os furos não-matelizados, que só podem ser feitos agora que todas as etapas galvânicas já se completaram;

**Recorte do painel e acabamento:** as placas individuais são separadas e cada placa recebe acabamento individualmente, como a retirada das rebarbas e do fio das laterais da placa;

**Adição do silkscreen:** a adição do silkscreen é feita por um processo serigráfico simples, onde as placas são montadas em um molde de alumínio e uma represa de tinta é deslocada (através de contrapesos) sobre a tela serigráfica e a placa, imprimindo o silkscreen. A placa então é secada num forno de média temperatura e depois ao ar livre;

**Teste elétrico:** todas as placas passam pelo teste elétrico de condutividade , onde todos os extremos possíveis são testados para garantir a condutibilidade de todas as trilhas e a verificação da existência de curtos entre as pistas. Este processo é feito por uma cama de pregos com pontas de prova automáticas;

**Embalagem e envio:** com a placa pronta e testada, as placas são embaladas e enviadas ao cliente.

**Colocação dos componentes:** a colocação dos componentes sobre a placa é realizada por máquinas totalmente automatizadas, as quais trabalham com dados gerados pelo próprio projetista de placas de circuito impresso. Inicialmente, a partir da lista de componentes, são selecionadas as fitas de componentes a serem utilizadas. Estas fitas são montadas num magazine, o qual é encaixado na máquina de montagem. Os dados com as coordenadas dos componentes são convertidos para os formatos exigidos pela máquina e então descarregados no computador que a controla.

**Soldagem:** a soldagem pode ser realizada por onda ou soldagem por refluxo. Na soldagem por onda, a placa passa tangencialmente, sobre uma esteira, por uma cuba cheia de liga de solda em estado liquido, na qual é provocada uma onda (semelhante às ondas do mar) na cuba. Esta onda de solda entra em contato com a placa no sentido do comprimento, soldando todos os terminais de componentes montados na face inferior da placa. No caso da soldagem por refluxo, os componentes são apenas colocados sobre a placa, a qual vai, também por uma esteira, para um forno. Na placa é aplicada a pasta de solda; esta pasta se funde no forno, soldando todos os componentes.

### 2.7.3. Insumos

O principal insumo da indústria de placas de circuito impresso é o laminado, cujo custo representa cerca da metade do preço da placa de circuito impresso, no caso de a base ser FR-2, ou cerca de 25% desse preço, se a base for FR-4. Cabe observar que tanto o laminado quanto a placa de circuito impresso são medidas em m<sup>2</sup>. Quanto ao cobre, pode-se dizer que não representa um item crucial na estrutura de custos da indústria de placa de circuito impresso, embora convenha observar que o Brasil importa concentrado de cobre (ABRACI, 2001).

Os clientes finais de placas de circuito impresso, constituídos pelas indústrias de tecnologia da informação, telecomunicações e eletrônica embarcada, exigem que esse produto esteja de acordo com especificações técnicas bastante rígidas, como, por exemplo, as normas do organismo norte-americano United Laboratories , sendo que um processo de certificação de um fornecedor de placas pelo cliente leva entre seis meses e um ano. Além disso, na prática, tanto o laminado quanto o cobre, que devem ter altíssima precisão (composição química, tolerância dimensional etc.), são quase sempre importados.

Em alguns casos, é empregada grafite como insumo na fabricação de placas, porque o carbono protege o contato metálico contra a oxidação em “botões” de controles remotos de televisores e aparelhos de som, entre outros.

No Brasil, existe apenas um fabricante de laminado com cobre e um fabricante de laminado nu. Essas empresas não atendem inteiramente à demanda da indústria nacional de placas de circuito impresso, obrigada a recorrer aos fornecedores internacionais.

### 2.7.4. Mercado nacional e internacional

A situação da indústria eletrônica brasileira e sua dependência cada vez maior de componentes não fabricados no país foram analisadas em detalhes por Melo, Rios e Gutierrez (2001).

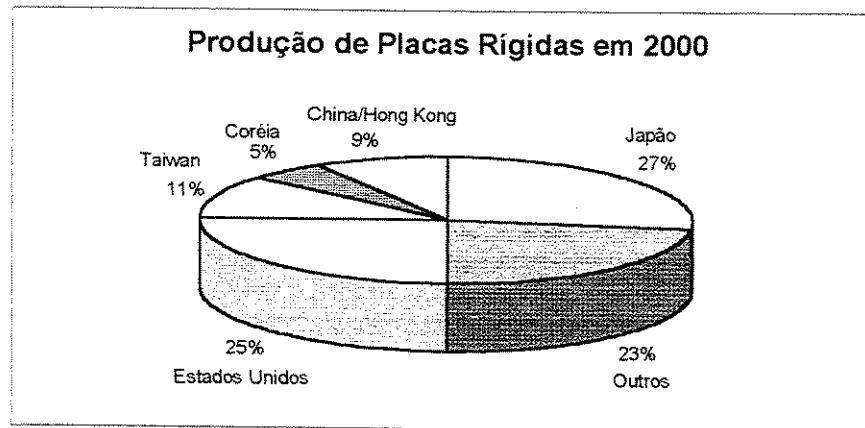
De acordo com o Technology Market Research Council (TMRC), em 2000 o mercado mundial de placas de circuito impresso rígidas ultrapassou US\$ 38,8 bilhões, enquanto o de placas flexíveis foi de US\$ 3,9 bilhões. Analisando-se somente as placas rígidas, verifica-se que o mercado mundial a partir de 1997, quando atingiu US\$ 28,8 bilhões, tem crescido a uma taxa média anual superior a 10%.

A presença cada vez maior da eletrônica e, portanto, das placas de circuito impresso na vida do homem contemporâneo, devido à informática, às telecomunicações e à eletrônica embarcada, automotiva e de bens de consumo, justifica esse crescimento. Por outro lado, a crescente utilização de tecnologias mais complexas vem privilegiando o valor de mercado dos circuitos multicamadas em detrimento dos mais simples.

O valor das placas de circuito impresso aumenta de acordo com a sua complexidade. Entretanto, a análise física do mercado mundial permite concluir que existe atualmente o predomínio dos circuitos multicamadas. Segundo o TMRC, em 2000 eles foram responsáveis por 47% do consumo mundial de laminados rígidos, enquanto os circuitos convencionais atingiram 32% e os outros circuitos 21%.

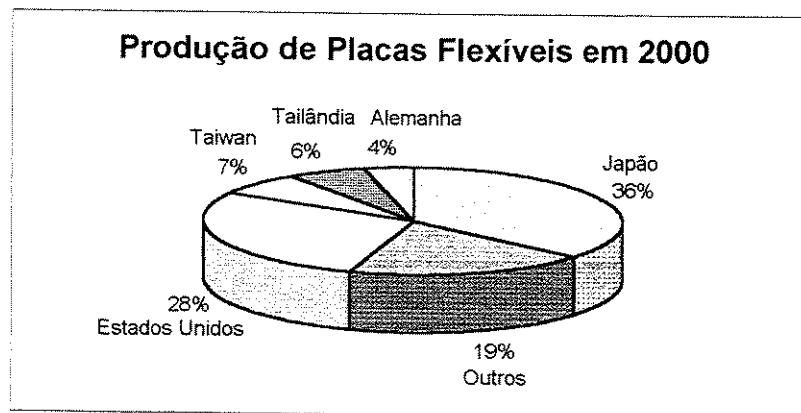
Vale destacar o papel do Japão, líder em faturamento tanto de placas de circuito impresso rígidas quanto flexíveis, como pode ser visto nas figuras 2 e 3. Nesse país também vem diminuindo a fabricação de placas de circuito impresso mais simples e aumentando a produção das placas de maior complexidade. Por exemplo, cerca de metade das placas que utilizam as chamadas microvias são fabricadas no Japão, que as fornece para terminais celulares, câmeras digitais, notebooks, palm tops e, principalmente, bases de montagem de chips de circuitos integrados.

A maior parte do mercado brasileiro de placas de circuito impresso tem sido suprida por importações, pois, apesar de a indústria nacional ser competitiva quanto à qualidade de seus produtos e praticar preços coerentes com os fabricantes americanos e europeus, a concorrência com os países asiáticos é extremamente difícil. Lá estão localizadas as principais plantas de produtos eletrônicos do mundo e, assim, suas fábricas de placas de circuito impresso operam com grandes escalas, reduzindo significativamente os preços das placas produzidas. Além disso, bens eletrônicos recentes, como terminais celulares ou equipamentos de telecomunicações de última geração, utilizam placas extremamente complexas, cuja tecnologia de fabricação ainda não está disponível no país.



Fonte: TMRC

**Figura 2 – Produção de Placas Rígidas em 2000**



Fonte: TMRC

**Figura 3 – Produção de Placas Flexíveis em 2000**

Portanto, para dimensionar o mercado brasileiro é importante conhecer o comportamento recente da importação de placas de circuito impresso, tanto na forma de placa nua como de placa montada. Segundo empresas do setor, uma placa nua representa, em média, cerca de 7% do valor de uma placa montada, o que permite saber o montante aproximado da importação de placas contidas em módulos. Por outro lado, o preço da produção interna de placas de circuito impresso destinadas ao mercado brasileiro está cerca de 15% acima do equivalente internacional, correspondendo aos custos de

internação. Assim, corrigindo-se esse valor faturado e somando-o ao total das importações, chega-se ao valor estimado do mercado brasileiro, em dólares , como pode ser visto na Tabela 12.

**Tabela 12 - Importação e Mercado Interno de Placas de Circuito Impresso**  
**(Em US\$ Mil) – 1999/2000**

	<b>1999</b>	<b>2000</b>
Importação de Placas Nuas	150.620	217.284
Importação de Placas Montadas	691.097	899.829
Placas Nuas Contidas nas Placas Montadas Importadas	48.377	62.988
<b>Total de Importações</b>	<b>198.997</b>	<b>280.272</b>
Faturamento para o Mercado Interno	93.000	127.000
<b>Vendas Internas Corrigidas</b>	<b>79.000</b>	<b>108.000</b>
<b>Mercado Brasileiro</b>	<b>277.977</b>	<b>388.272</b>

Fontes: ABRACI, ABINEE e BNDES

Assim, em trabalho elaborado para dimensionar o mercado- alvo de placas de circuito impresso rígidas, uma empresa do setor analisou separadamente os segmentos de consumo, telecomunicações, informática e automotivo. Foi estimado o consumo de placas de circuito impresso em cada um dos principais produtos fabricados no país, sendo os totais obtidos multiplicados pelo número de unidades produzidas nos três últimos anos. Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 13 com a evolução da participação de cada segmento nesse mercado, quantificado de acordo com a área produzida (metros quadrados).

**Tabela 13 - Mercado – Alvo Brasileiro por Segmento (m<sup>2</sup>) – 1998/2000**

	1998	1999	2000
<b>Telecomunicações</b>	158.304	247.861	329.473
<b>Consumo</b>	1.950.694	1.440.777	1.836.327
<b>Informática</b>	421.881	471.710	639.533
<b>Automotivo</b>	475.690	405.249	518.040

Fontes: Empresas do setor (Borsoi, 2002)

O mercado a ser atingido pelas empresas brasileiras a curto e médio prazos situa-se ao redor de 3,3 milhões de metros quadrados. Entretanto, a produção nacional de placas de circuito impresso,

majoritariamente voltada para o mercado interno, tem evoluído em patamar bastante inferior, como pode ser visto na Tabela 14. Esse fato pode ser atribuído, principalmente, à importação de kits completos ou mesmo de placas montadas, legalmente importadas ou não, para confecção dos bens finais.

**Tabela 14 - Produção Física de Placas de Circuito Impresso (em m<sup>2</sup>) – 1989 e 1995/2001**

PRODUÇÃO	1997	1998	1999	2000	2001*
Profissional	509.000	412.000	408.000	475.000	267.000
Convencional	1.000.000	900.000	706.000	871.000	422.000
<b>Total</b>	<b>1.509.000</b>	<b>1.312.000</b>	<b>1.108.000</b>	<b>1.346.000</b>	<b>689.000</b>

Fonte: Abraci.

\* Até Junho

É importante observar que ao final da década de 80 o mercado interno era praticamente atendido pela produção brasileira, sendo a redução da participação nacional nesse mercado um fenômeno do início dos anos 90 e que vem se aprofundando a cada ano. Ele coincide com o final da reserva de mercado para a informática e a exposição das empresas brasileiras produtoras de bens eletrônicos à concorrência internacional (Melo, Rios e Gutierrez, 2001). Com o fechamento de diversas empresas, seus fornecedores passaram a ter problemas de mercado e, consequentemente, desapareceram também muitos fabricantes de placas de circuito impresso.

Como foi visto, o principal insumo utilizado pela indústria de placas de circuito impresso brasileira é o laminado, que possui um único fornecedor nacional e não atende a todo o mercado, tornando obrigatória a importação de laminados, especialmente aqueles de menor demanda. Os preços praticados por esse fornecedor, segundo a indústria de placas de circuito impresso, aproximam-se dos preços internacionais dos laminados similares acrescidos dos custos de internação.

A Tabela 15 mostra a evolução das importações de laminados FR-2 e FR-4 nos últimos anos e permite a sua comparação com as vendas da indústria brasileira de placas de circuito impresso no mercado interno.

**Tabela 15 - Importação de Laminado e Faturamento Local (em US\$ mil) – 1997/2000**

	1997	1998	1999	2000
<b>Faturamento Local</b>	<b>80.000</b>	<b>72.000</b>	<b>93.000</b>	<b>127.000</b>
Importação de FR-2	2.610	1.440	2.742	5.140
Importação de FR-4	4.694	1.297	856	3.338
<b>Total das Importações</b>	<b>7.304</b>	<b>2.737</b>	<b>3.598</b>	<b>8.478</b>

Fonte: Abraci

## **Capítulo 3**

### **Caracterização do problema**

A maioria dos consumidores desconhecem os materiais tóxicos presentes na composição de um computador. Em geral, os computadores são compostos de mais de 1000 materiais, dos quais alguns são altamente tóxicos. Em sua composição estão presentes, substâncias contendo bromo, cloro, metais tóxicos, materiais biologicamente ativos, ácidos, plásticos e elementos aditivos de plástico.

**Tabela 16 – Composição de um computador e índice de materiais recicláveis**

Material	% Em Relação ao Peso Total	% Reciclável	Localização
Alumínio	14,172	80	Circuito integrado, solda, bateria
Chumbo	6,298	5	Semicondutor
Ferro	20,471	80	Estrutura , encaixes
Estanho	1,007	70	Circuito integrado
Cobre	6,928	90	Condutivo
Bário	0,031	0	Válvula eletrônica
Níquel	0,850	80	Estrutura, encaixes
Zinco	2,204	60	Bateria
Berílio	0,015	0	Condutivo térmico, conectores
Ouro	0,016	98	Conexão, condutivo
Manganês	0,031	0	Estrutura, encaixes
Prata	0,018	98	Condutivo
Cromo	0,006	0	Decoração, proteção contra corrosão
Cádmio	0,009	0	Bateria, chip, semicondutor, estabilizadores
Mercúrio	0,002	0	Bateria, ligamentos, termostatos, sensores
Silica	24,880	0	Vidro

Fonte: Microelectronics and Computer Technology Corporation, 2000.

Segundo Menetti e Tenório (1996), equipamentos utilizados na indústria de processamento de dados ou de entretenimento podem conter mais de 30% de placas de circuito impresso. Estas placas são formadas por unidades isoladas e integradas e em sua sucata pode conter cobre, chumbo, cádmio, zinco, estanho, bem como os metais preciosos ouro, prata e platina, e outros metais. Além de metais e ligas metálicas, as placas de circuito impresso contêm vários compostos orgânicos e inorgânicos. As tabelas 17 e 18 mostram como linha geral a composição das placas de circuito impresso.

**Tabela 17 – Composição das placas de circuito impresso**

Composição	(%)
Materiais cerâmicos, vidros e óxidos	30
Plásticos	26
Bromo	4
Metais	40

Fonte: Menetti, Chaves e Tenório, 1996 (a)

**Tabela 18 – Composição das placas de circuito impresso**

Composição		(%)
Materiais cerâmicos, vidros e óxidos	Sílica	15
	Alumina	6
	Óxidos alcalinos e alcalinos terrosos	6
	Outros óxidos	3
Plásticos	Polímeros (polietileno, polipropileno, poliésteres e policarbonetos)	26
	Plásticos halogenados (Br)	4
Metais	Metais bases (Cu, Fe, Sn, Ni, Al, Pb, Zn e outros)	39,5
	Metais preciosos (Ag, Au e Pd)	0,5

Fonte: Menetti, Chaves e Tenório, 1996 (b)

A composição real depende da origem do circuito impresso, assim como do tipo e idade do equipamento. A concentração média de cobre, por exemplo, é de 29.800 ppm em computadores antigos, 37.000 ppm em novos e 44.900 ppm em equipamentos de vídeo. Outro exemplo é dado com a concentração de ouro: 1.050 ppm em computadores antigos, 750 ppm em novos e 870 ppm em equipamentos de vídeo.

O tratamento destes resíduos, compatível ao meio ambiente, é um processo complexo, considerando-se a composição heterogênea dos equipamentos obsoletos, pois, existe a periculosidade

de muitos dos seus componentes, capazes de permanecer nos solos e no limiar da cadeia alimentar humana por tempo indeterminado. Os perigos dessa situação pairam sobre o meio ambiente e a saúde humana, para além dos aterros que consomem muitos equipamentos depositados sem uso. Muitos desses componentes são metais pesados, o que significa um motivo a mais de preocupação (Stuart e Lu, 2000 e Yang e Sieben, 2001).

### **3.1. Destinação da sucata**

As constantes ocorrências da disposição inadequada de resíduos sólidos em áreas consideradas impróprias constituem uma realidade, que a cada dia, torna-se mais freqüente, causando a poluição do solo, água e ar.

No Brasil e no mundo, o mercado de computadores vem apresentando um desempenho espantoso, gerando resíduos tecnológicos de milhões de equipamentos que se tornam obsoletos a cada momento. A rápida obsolescência dos computadores é uma preocupação atual em razão da disposição inadequada desses resíduos, acarretando consequências para o ambiente e a saúde do ser humano. Praticamente não existem informações na literatura brasileira, sobre o risco de contaminação ambiental devido ao descarte inadequado, e o destino da sucata dos computadores.

Além dos resíduos propriamente ditos, a migração de chorume no solo e na água devido a descartes inadequados pode levar ao seu comprometimento através da contaminação por compostos de íons metálicos. O chorume, normalmente, surge imediatamente após a disposição e sua presença ocorre durante toda a vida útil da área de disposição, podendo perdurar por décadas, após o encerramento das atividades e exigindo ações corretivas durante vários anos, com o objetivo de remediar a contaminação (Musson et al., 2000).

Em outras partes do mundo (Estados Unidos, Europa e China) tem-se verificado a preocupação sobre como conseguir retirar um melhor proveito econômico do lixo eletrônico, através de recuperação de metais e a reciclagem de componentes eletrônicos (Fthenakis, 2000).

Nos países da Europa e dos Estados Unidos, de acordo com a legislação, as empresas são obrigadas a tomar conta desse problema. A prática adotada em países como Bélgica, Suécia, Holanda, Alemanha, e também no Japão, é o consumidor comprar o produto, e devolvê-la à loja quando não a quer mais, e esta encaminha à fábrica, que faz a reciclagem. Nesses países, contudo, as empresas têm incentivos para isso, como subsídios ou descontos nos impostos.

Em vários países do mundo como, Estados Unidos, China, Japão e Alemanha, já existem trabalhos abordando o problema da destinação dos computadores, a maior parte da sucata é disposta de forma inadequada junto com o lixo doméstico, sendo depositados em aterros ou incinerados sem tratamento prévio. Ambas as formas trazem grandes prejuízos para o meio ambiente e a saúde pública.

Segundo Lee (1999) e Shih (2001), algumas empresas têm antecipado a solução do problema, criando programas para recolher os produtos que produzem e que posteriormente serão descartados. Nesses programas o próprio consumidor ou por um rateio entre o consumidor, fabricante e o governo, pagam uma taxa no ato da compra para que no futuro o produto seja recolhido e reciclado.

A principal preocupação é quanto à reciclagem dos metais presentes nas placas de circuito impresso dos computadores, evitando-se assim a geração e consequente disposição de toneladas de resíduos perigosos presentes nas placas como o cádmio, chumbo e mercúrio (Ochiai, 1996).

Ainda segundo Menetti, Chaves e Tenório (1996 b), a reciclagem de materiais metálicos é importante por diminuir a geração de resíduos e representar um ganho econômico com os próprios metais, tais como alumínio, chumbo, cobre e, particularmente, os metais nobres: ouro, prata e platina.

Várias tecnologias são utilizadas para a reciclagem de sucatas eletrônicas, incluindo processos mecânicos, químicos e térmicos, sendo o mecânico o que menos gera resíduos finais prejudiciais ao ambiente (Veit, 2001).

Hoffmann (1992) afirma que os processos hidrometalúrgicos de processamento de sucatas de circuito impresso representam diversas etapas e são utilizados apenas para a fração contendo metais. Os substratos não metálicos geram resíduos que devem ser, então, tratados termicamente ou dispostos.

Já os processos pirometalúrgicos, estudados anteriormente por Bernardes et al. (1997) e Felix e Riet (1994), geram uma liga metálica, e óxidos metálicos na forma de pó, que são retirados do sistema através de filtração do ar. Um dos problemas associado a processos pirometalúrgicos é a geração de dioxinas, formadas pela incineração dos materiais orgânicos clorados.

Desta forma, um pré-tratamento da sucata por meios mecânicos pode ser interessante. Assim poder-se-á obter uma separação prévia dos metais e só então encaminhá-los a processos hidrometalúrgicos ou a produção secundária de cobre, tornando o reprocessamento destes metais uma tecnologia mais limpa.

Segundo Zhang e Forssberg (1999) o processamento mecânico de sucatas é visto, em geral, como um pré-tratamento para o real reaproveitamento dos materiais, e associa diferentes estágios de separação de compostos e componentes da sucata. Assim, fazem parte deste processo a cominuição, a classificação e a separação dos diferentes componentes do rejeito.

Após cada etapa a fração resultante já está, em geral, enriquecida em certos materiais, os quais podem ser separados do fluxo principal. Em placas de circuito impresso existem compósitos finamente estruturados de plásticos e metais, os quais podem ser separados apenas por cominuição fina. O ferro pode ser retirado por separação magnética, e metais não ferrosos são removidos por diferenças de densidade, peso e propriedades magnéticas. E após a última etapa de concentração alcançados por cominuição, concentrados e resíduos podem ser limpos por classificação hidráulica e separação por densidade. Dos materiais presentes na composição das placas, os metais são as partes mais valiosas e justificam sua reciclagem, tornando-a “economicamente atrativa” (Gupta e McLean, 1996 e Kopacek e Kopacek, 1999).

No Brasil, até o momento, praticamente não existem informações na literatura sobre o destino da sucata eletrônica. Acredita-se que na sua maioria, são dispostas em aterros de forma inadequada. Alguns estudos sugerem a reciclagem de alguns componentes, com intuito de recuperar os metais preciosos contidos, através de titulometria (Menetti e Tenório, 1996).

Segundo Daskalopoulos, Badr e Probert (1997), as bases de um processo de descarte, orientado para a aceitação ambiental, são:

- Diminuir ou evitar a geração de resíduos;
- Reutilizar os resíduos;
- Dispor de maneira compatível ao meio ambiente, ou seja, resíduos que não podem ser reutilizados devem estar de tal forma inertes, que possam ser depositados sem impacto às zonas adjacentes.

Estas medidas são definidas como responsabilidade de toda a sociedade e tendo como objetivo prioritário a não geração de resíduos, devendo o sistema de gerenciamento priorizar a minimização, a reutilização, a reciclagem e o tratamento antes do encaminhamento à disposição final adequada.

### **3.2. Contaminações ambientais por metais pesados**

Entre os poluentes mais prejudiciais ao ecossistema estão os metais pesados. Estes elementos existem naturalmente no ambiente e são necessários em concentrações mínimas na manutenção da saúde dos seres vivos. Alguns metais essenciais aos organismos são o ferro, cobre, zinco, cobalto, manganês, cromo, molibdênio, vanádio, selênio, níquel e pigmentos respiratórios (como o ferro na hemoglobina humana). No entanto, quando ocorre o aumento destas concentrações, normalmente acima de 10 vezes, efeitos deletérios começam a surgir (Tchobanoglous, Theisen e Vigil, 1993).

Como já mencionado, na composição das placas e componentes de circuito impresso podemos encontrar concentrações de vários metais pesados, por isso, se as mesmas forem descartadas de forma inadequada poderão ocasionar impactos a saúde e ao ambiente.

O grupo de metais pesados comprehende 40 elementos químicos com características toxicológicas e efeitos específicos para cada um deles. A ordem decrescente de toxicidade dos metais pesados, admitida atualmente, é a seguinte: mercúrio (Hg), prata (Ag), cobre (Cu), cádmio (Cd), zinco

(Zn), chumbo (Pb), cromo (Cr), níquel (Ni), cobalto (Co), entre outros (Tchobanoglous, Theisen e Vigil, 1993).

### 3.2.1. Contaminação atmosférica

A contaminação antropogênica do ar por metais ocorre a partir de gases e partículas derivados da combustão de carburantes fósseis usados pela indústria ou veículos automotores. A mineração e o refino são, também, fontes poluidoras bastante significativas, além da fundição de metais.

Os metais possuem baixa pressão de vapor, sendo pouco voláteis, o que torna a sua taxa de emissão pouco elevada. Todavia, nos processos em que são utilizadas altas temperaturas (fundição e combustão de carburantes fósseis), a emissão se eleva consideravelmente.

As minas e processos de refino de minerais de ferro, zinco, manganês, cobre e chumbo, que contêm arsênio e cádmio, constituem uma das grandes fontes de poluição atmosférica por metais pesados. Ressalta-se que a exposição ocupacional a estes metais ocorre durante tais processos de refino e durante as operações de soldar, cortar, fundir e recuperar metais (Higesa, 2000).

### 3.2.2. Contaminação do solo

A maioria dos efluentes tóxicos de fundições difundem-se para a atmosfera. Entretanto, são mais importantes como poluentes do solo, onde permanecem por longos períodos.

A concentração de metais nos solos varia de região para região. Sabe-se que, se um solo for acidificado, aumenta a mobilização de alguns metais, o que aumenta a sua absorção pelas plantas. O alumínio, o cádmio, o manganês e o ferro possuem grande mobilidade no solo; o cobre e o níquel, mobilidade média; enquanto que o cobalto e o chumbo têm baixa mobilidade. As raízes e folhas das plantas têm a propriedade de absorver metais. Compostos de fertilizantes inibem o desenvolvimento de inúmeras espécies vegetais. A sua respectiva deposição no solo, através da irrigação com águas contaminadas, representa um risco de esterilização do mesmo (Alloway, 1995).

### 3.2.3. Contaminação aquática

As principais fontes de contaminação por metais são efluentes industriais e a drenagem natural das áreas agrícolas contaminadas por biocidas que contenham metais pesados em sua composição.

A distribuição dos numerosos metais pesados no meio aquoso depende, sobretudo, dos mecanismos de absorção; depende da maior ou menor quantidade de substâncias orgânicas dissolvidas no meio ou partículas finas, dotadas de uma cobertura formada por microorganismos, facilitando, assim, a absorção destes contaminantes pelos componentes da biota aquática.

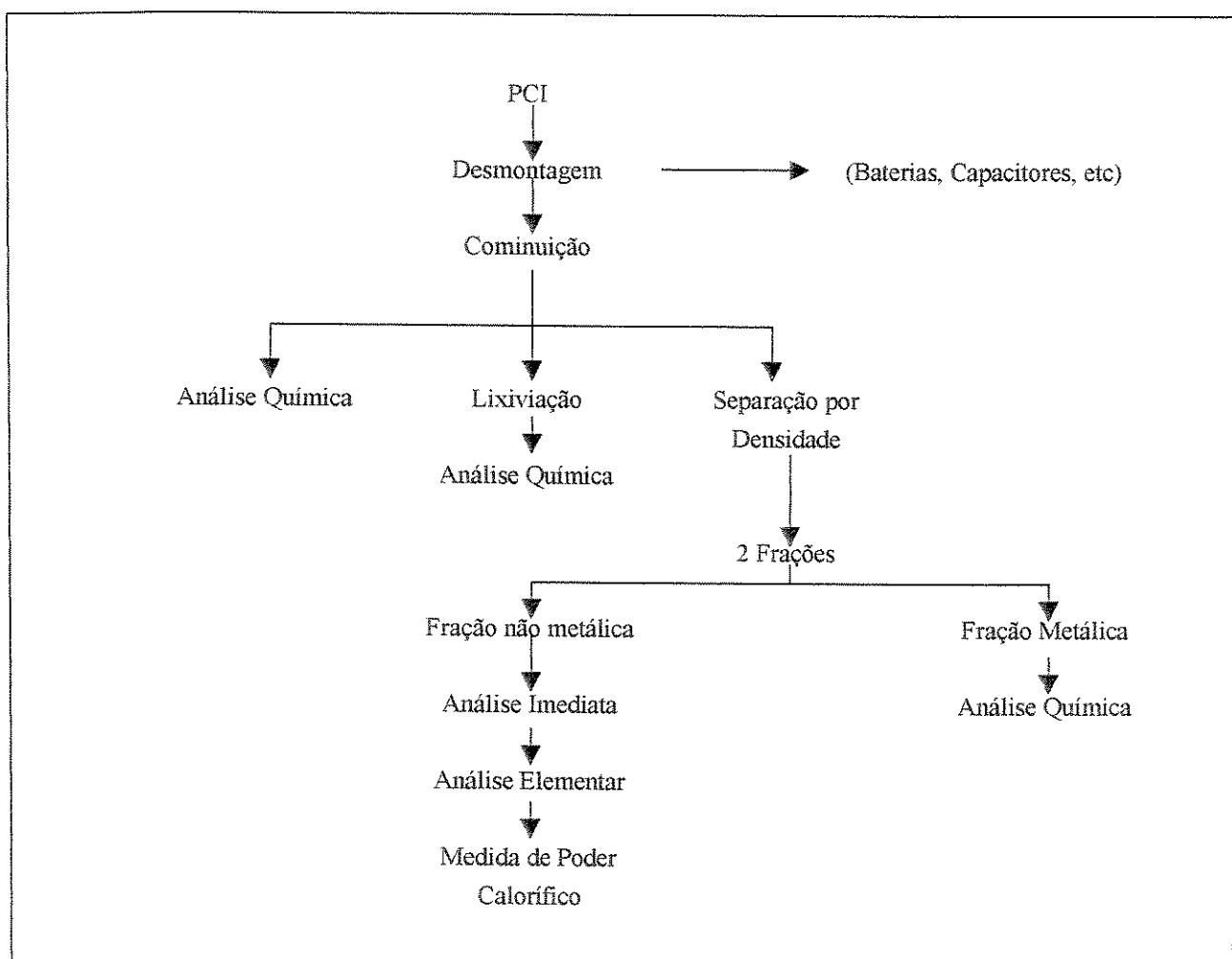
O teor de chumbo, ferro, níquel e cobre (assim como em ácidos graxos, hidrocarbonetos e compostos organoclorados) é 1,5 a 5 vezes superior na capa ultra-superficial, estando os metais absorvidos ao material particulado e às moléculas orgânicas.

Cabe ressaltar que a toxicidade de uma substância corresponde a determinação de sua concentração. Uma série destes metais inclui-se entre os elementos biogenéticos, visto que são necessários traços de sua presença para permitir o funcionamento normal das diferentes rotas metabólicas do organismo, como, por exemplo, manganês, cobalto, cobre, zinco e alguns organismos, também o vanádio, o cromo, molibdênio, níquel e cádmio. Portanto, para avaliar a qualidade da água, é necessária uma análise da concentração de metais pesados. Todavia, existem dificuldades nesta análise, pois a quantidade de metal detectável na água não corresponde, necessariamente, às verdadeiras proporções de contaminação ambiental (Higesa, 2000).

## Capítulo 4

### Metodologia

Neste trabalho o processamento das placas de circuito impresso envolveu várias etapas afim de caracterizar e classificar esse resíduo quanto a sua periculosidade. O fluxograma abaixo mostra um esquema de todo o processo.



#### **4.1. Coleta e preparo da amostra**

As placas de circuito impresso usadas neste trabalho, contendo todos os componentes, foram coletadas na sucata da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp.

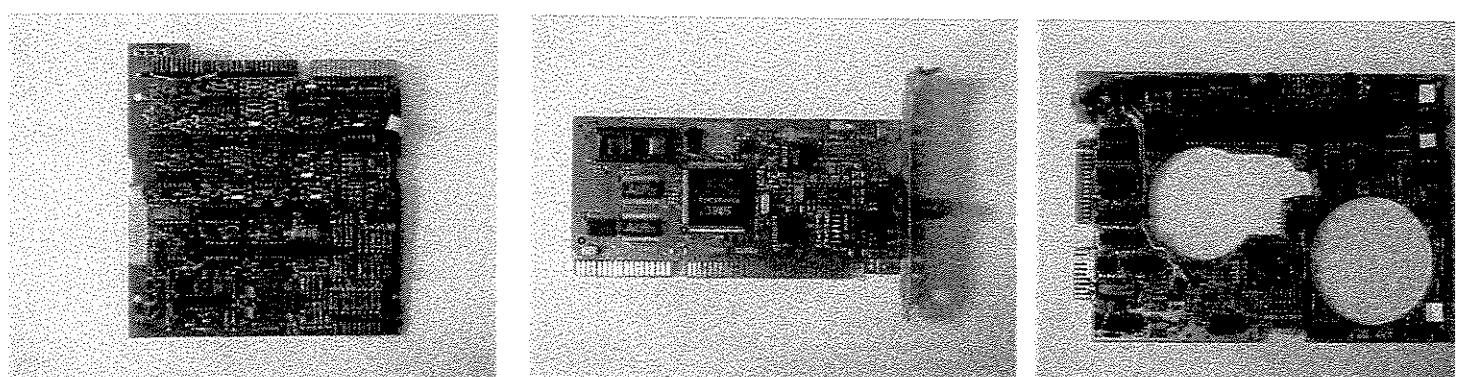
Para a realização de todo o trabalho foram coletados aproximadamente 12 Kg de placas de circuito impresso proveniente de computadores dos mais variados tipos (XT, 486 e Pentium) e idades. Foram retirados manualmente alguns componentes, como cabos, fios, e conectores.

Do material coletado, foram separadas quatro tipos de sucatas, sendo :

- sucata de placas de circuito impresso de computadores XT ;
- sucata de placas de circuito impresso de computadores 486 ;
- sucata de placas de circuito impresso de computadores Pentium;
- sucata total contendo todos os tipos de placas de circuito impresso (XT, 486 e Pentium).

Após a etapa de separação, as placas foram moídas em um moinho de facas até atingirem uma granulometria inferior a 9,5 mm. Antes das análises cada tipo de sucata foi homogeneizada e em seguida retirada uma fração originando a amostra.

A figura 4 mostra alguns tipos de placa de circuito impresso antes de qualquer processamento.



**Figura 4 – Placas de circuito impresso**

#### **4.2. Separação por densidade**

Após a moagem e homogeneização, foi realizada a separação por gravimetria da fração leve da fração pesada de cada tipo de sucata. O processo utilizado envolve o uso de líquidos de alta densidade relativa. Essa técnica é usada para separar partículas sólidas por meio da diferença de densidade. As partículas que tem de ser separadas são imersas em um líquido que tem um valor de densidade intermediária entre os valores dos dois componentes que se pretende separar (Ron e Penev, 1995). As partículas mais pesadas vão para o fundo enquanto as partículas mais leves flutuam na superfície, obtendo-se assim diferentes amostras.

A seguir é apresentada na tabela 19 alguns líquidos densos típicos, suas respectivas densidades e também algumas diluições utilizadas:

**Tabela 19 – Tabela de líquidos densos e sua densidade empregada em testes**

Líquido Denso	Densidade (g.cm <sup>-3</sup> )
H <sub>2</sub> O	1,0
NaCl + H <sub>2</sub> O	1,2
CaCl <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	1,5
Acetona : TBE = 4 : 5	2,0
Acetona : TBE = 0,27 : 1	2,5
Tetrabromoetano	2,96
Bromofórmio	2,89

Fonte: Zhang, 1999

O líquido utilizado foi o bromofórmio (CHBr<sub>3</sub>), o qual, entre líquidos de alta densidade, apresentou o menor custo. Com densidade de 2,89 g.cm<sup>-3</sup>, o CHBr<sub>3</sub> permite separar partes de placas de circuito impresso e plásticos, das parcelas metálicas.

O CHBr<sub>3</sub> foi colocado em um funil de separação com capacidade de 500 mL, e após foi adicionado 20 gramas da amostra. Após 2 horas em média a separação é completada, ou seja, a parte

pesada (metais) decanta e a parte leve (polímeros e cerâmicas) flutua.

A separação da fração pesada e da fração leve foi feita utilizando uma malha de aço com abertura de 0,15 mm, que permitia a passagem do CHBr<sub>3</sub> mas retinha o material sólido, primeiramente da fração pesada e em outra etapa da fração leve. Após cada separação realizada, o CHBr<sub>3</sub> era reaproveitado através de filtração a vácuo , utilizando papel de filtro . Na tabela 20 pode-se observar a densidade dos diferentes materiais que compunham as placas de circuito impresso, prevendo-se qual afunda e qual flutua numa densidade de 2,89 g.cm<sup>-3</sup>.

**Tabela 20 – Densidade de materiais presentes nas placas de circuito impresso**

Material	Densidade (g.cm <sup>-3</sup> )	Material	Densidade (g.cm <sup>-3</sup> )
Ouro	19,3	Alumina	3,99
Chumbo	11,3	Alumínio	2,7
Prata	10,5	Vidro	2,24
Cobre	8,9	Teflon	2,2
Níquel	8,9	Magnésio	1,7
Ferro	7,9	PVC	1,7
Estanho	7,31	Silica	1,7 – 2,2
Zinco	7,14	Policarbonatos	1,2

Fonte : Langes Handbook of Chemistry

#### **4.3. Caracterização das placas de circuito impresso**

A caracterização das placas de circuito impresso foi realizada com o objetivo de identificar e quantificar o maior número possível de elementos utilizados na fabricação da mesma e que, posteriormente, serão submetidas a tratamentos ou descartadas. A concentração e o comportamento desses elementos, são de grande importância para a classificação das placas como resíduos sólidos, como também para a avaliação ambiental e o potencial de risco da manipulação dessas sucatas. Para tanto, algumas análises foram realizadas e uma breve descrição sobre as técnicas utilizadas e sua finalidade estão apresentadas a seguir.

#### 4.3.1. Análise imediata e análise elementar

A análise imediata consiste em submeter a amostra a ser analisada, a uma seqüência de etapas, que fornece as frações em massa de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo. A umidade a que se refere essa análise é a água absorvida pela amostra, geralmente durante seu armazenamento. A fração de materiais voláteis é composta de hidrocarbonetos e gases tais como hidrogênio, monóxido de carbono e metano. O carbono fixo é a fração de material orgânico não liberado durante a volatilização, sendo composto principalmente de carbono, embora possa conter outros elementos. As cinzas são compostas basicamente de óxidos metálicos, pois estes não sofrem combustão.

##### *Etapa 1*

A primeira análise a ser feita na amostra é a análise de umidade. A amostra é submetida a processo de secagem em temperatura que varia de 104 a 110 °C e por um tempo também variável, que depende do teor de umidade contido na amostra. Uma vez estabilizada a massa da amostra, pode-se determinar o teor de umidade por subtração da massa final na massa inicial (ASTM D-3173).

##### *Etapa 2*

Posteriormente é determinado o teor de voláteis que consiste em submeter a amostra seca, obtida da etapa anterior, à temperatura de 950°C durante 6 minutos. Tal procedimento, que caracteriza a etapa 2, foi baseado na norma ASTM D-3175.

##### *Etapa 3*

Determinada a fração volátil, a amostra é submetida a processo de calcinação. Este procedimento consiste no aquecimento da mesma à temperatura de 750°C por duas horas. Nesta etapa o carbono fixo é volatilizado e oxidado, restando apenas cinzas. Em outras palavras, a diferença entre a massa inicial da amostra e a massa de cinzas fornece o teor de carbono fixo (ASTM D-3174). Para efeito de comparação, apresentamos dados de outros combustíveis e resíduos na Tabela 21.

A análise elementar fornece frações em peso dos elementos constituintes de materiais combustível. Os principais elementos são carbono, nitrogênio e hidrogênio.

A análise elementar para carbono, hidrogênio, nitrogênio, foram determinadas pela Central Analítica do Instituto de Química da Unicamp, através do equipamento Perkin Elmer – Séries II 2400.

Como resultado da análise elementar resta um resíduo que também é considerado, primeiramente como cinzas. Raramente a porção deste resíduo se iguala a concentração de cinzas determinada pela análise imediata, devido a pequenos erros de diferença de técnicas; de qualquer modo, uma amostra com alto teor de cinzas possui um correspondente alto teor de resíduos.

**Tabela 21 – Análise imediata típica de alguns materiais combustíveis**

	Umidade %	Cinzas %	Voláteis %
Coque metalúrgico	0,7	80	--
Coque/gás	15	14	--
Coque de lenha	3,4	1,5	7
Bagaço	45 a 50	1,0	45
Turfa (seca ao ar)	6-25	8-12	50-60
Bambu	10	4	68
Pó de tabaco	6	45	43
Recortes de couro	13,7	4,7	58,5
Restos de borracha	0,0	64	35,5
Sementes de girassol	9,5	2,1	74,0
Cascas de cacau	7-9	7	64

Fonte: Ravaglia, 1965

#### 4.3.2. Medida de poder calorífico de combustível em bomba calorimétrica

O poder calorífico foi determinado utilizando-se a técnica da bomba calorimétrica (ASTM D-2015). A bomba calorimétrica é utilizada para medir o calor liberado pela combustão do combustível com oxigênio. Todas as amostras devem passar por uma peneira de malha 60 (250 µm), e são queimadas em oxigênio puro a uma pressão de 3000 kPa (ASTM D-3175) não havendo escoamento de combustível.

Uma determinada quantidade do combustível é fechada dentro de um recipiente de metal com atmosfera de oxigênio sob alta pressão. A bomba é então mergulhada em um recipiente com parede dupla contendo água em seu interior e na camisa; a ignição do combustível é feita através de uma conexão elétrica externa. A temperatura da água é medida em função do tempo antes e depois do processo de ignição. Conhecendo-se a massa de água do sistema, a massa e calor específico do recipiente, as curvas de aquecimento e resfriamento da água, pode-se determinar a energia liberada durante o processo de combustão.

Um agitador assegura a uniformidade da temperatura da água ao redor da bomba. Em algumas circunstâncias o calor externo deve ser adicionado à camisa de água para manter a uniformidade de temperatura, enquanto em outras circunstâncias a camisa é deixada vazia visando manter uma condição aproximadamente adiabática no recipiente de água interno. Uma compensação devida ao calor perdido ao ambiente pode ser feita através da análise das curvas de aquecimento e resfriamento. Esta técnica determina o poder calorífico superior a volume constante, que pode ser convertido para poder calorífico inferior por cálculos analíticos (apêndice B). O poder calorífico de alguns combustíveis estão apresentados na Tabela 22.

**Tabela 22 – Poder calorífico inferior de alguns materiais combustíveis**

<b>COMBUSTÍVEL</b>	<b>MJ/kg</b>
Aparas vinilo	26,26
Bagaço de cana(20% de água)	13,34
Bambu (10% de água)	15,42
Carvão mineral tubarão/SC	18,76
Carvão vegetal	31,26
Casca de arroz (12%água)	13,75
Sisal (11% água)	14,17
Lascas de madeira	13,75
Lenha (40%água)	10,00
Palha de trigo (20% água)	13,34
Papel	17,51
Fibra de palmeira (48%água)	8,34
Filme de polietileno	23,34
Tecido nylon	30,43
Restos de Borracha	16,67

Fonte: Torreira (1995)

#### 4.3.3. Lixiviação de resíduos

O ensaio de lixiviação baseia-se no princípio de que não existe material completamente insolúvel, ou seja, quando se coloca um material sólido em contato com um líquido, alguns constituintes se dissolvem e permanecerão assim no lixiviado. A concentração desse constituinte no lixiviado é usado para classificar o resíduo como perigoso ou não.

O ensaio de lixiviação será baseado no método descrito pela NBR 10005 – Lixiviação de Resíduos. Este método consiste na separação e identificação de certas substâncias contidas nos resíduos industriais por meio de lavagem ou percolação.

A amostra obtida, fase sólida, é passada para o extrator, devendo ser adicionada água deionizada. Após início da agitação, o pH deve ser corrigido mediante a adição de ácido acético 0,5 N, e mantido no valor de  $5,0 \pm 0,2$ . Após a correção inicial do pH, a mistura deverá ser agitada por 24 h, podendo estender-se até 28 h, terminada a agitação e adiciona-se uma quantidade de água deionizada calculada, determinada pela norma. A fase líquida da mistura é separada da fase sólida através de equipamento de filtração. A solução assim obtida constitui o “lixiviado”, o qual deve ser submetido a análise química para verificação de periculosidade do resíduo. A tabela 23 mostra a concentração máxima permitida de alguns poluentes no teste de lixiviação, que podem ser encontrados em placas de circuito impresso.

**Tabela 23 – Concentração – limite máximo no extrato obtido no teste de lixiviação**

Código	Poluente	Limite máximo no lixiviado (mg/L)
D005	Arsênio	5,0
D006	Bário	100,0
D007	Cádmio	0,05
D008	Chumbo	5,0
D009	Cromo total	5,0
D010	Fluoreto	150,0
D011	Mercúrio	0,01
D012	Prata	5,0
D013	Selênio	1,0
D029	Organofosforados e carbamatos	10,0

Fonte: NBR10004 – Resíduos Sólidos/1987

#### 4.3.4. Solubilização de resíduos

O ensaio de solubilização será baseado no método descrito pela NBR 10006 – Solubilização de Resíduos. Este método consiste em fixar as condições exigíveis para diferenciar os resíduos da classe II e III, sendo somente aplicada para resíduos no estado físico sólido.

Em um frasco contendo a amostra, deve-se adicionar água deionizada ou destilada e agitar a amostra em baixa velocidade, por um determinado tempo, conforme descrito na norma. Após a agitação, tampa-se o frasco e deixa-se descansar por sete dias, passado os dias deve-se filtrar a solução com aparelho de filtração guarnecido com membrana filtrante com 0,45 µm de porosidade, preservando o filtrado para futura análise química.

A tabela 24 mostra alguns limites de concentrações de poluentes no ensaio de solubilização que são encontrados em placas de circuito impresso.

**Tabela 24 – Padrões para o teste de solubilização**

<b>Poluente</b>	<b>Limite máximo no extrato (mg/L)</b>
Arsênio	0,05
Bário	1,0
Cádmio	0,005
Chumbo	0,05
Cianeto	0,1
Cromo total	0,05
Fenol	0,001
Fluoreto	1,5
Mercúrio	0,001
Nitrato (mg N/L)	10,0
Prata	0,05
Selênio	0,01
Alumínio	0,2
Cobre	1,0
Dureza (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	500,0
Ferro	0,3
Manganês	0,1
Surfactantes (tensoativos)	0,2
Zinco	5,0

Fonte: NBR10004 – Resíduos Sólidos/1987

Para melhor avaliação dos resultados do ensaio, recomenda-se que sejam determinados no resíduo bruto os mesmos parâmetros determinados no lixiviado.

#### 4.3.5. Análise massa bruta

A tabela 25 mostra os limites máximos de poluentes na massa bruta do resíduo, que são utilizadas pelo Ministério do Meio ambiente da França, e adotadas de acordo com a NBR 10004 como indicativos para classificação de resíduos como perigosos. Os poluentes devem ser analisados no resíduo total. Se pelo menos um poluente estiver acima do limite máximo, o resíduo é classificado como perigoso, segundo a norma francesa. Este critério não é obrigatório na NBR 10004, que deixa a decisão ao órgão oficial de controle.

**Tabela 25 – Concentrações máximas de poluentes na massa bruta de resíduo**

Poluente	Limite máximo no resíduo total
Berílio ou seus componentes	100 mg Be/kg
Cromo VI ou seus compostos	100 mg Cr/kg
Mercúrio ou seus compostos	100 mg Hg/kg
Chumbo (compostos orgânicos)	100 mg Pb/kg
Selênio ou seus compostos	100 mg Se/kg
Arsênio ou seus compostos	1.000 mg As/kg
Chumbo (compostos minerais)	1.000 mg Pb/kg
Vanádio ou seus compostos	1.000 mg V/kg
Cianetos (produzidos por hidrólise)	1.000 mg CN/kg
Compostos aromáticos hidroxilados, como fenóis	10 mg fenol/kg
Solventes cíclicos não-parafinicos, exceto os já citados	5% em massa
Solventes halogenados, exceto os já citados	5% em massa
Hidrocarbonetos líquidos ou bombeáveis a 80°C, exceto os já citados	5% em massa
Substâncias explosivas, exceto as já citadas	5% em massa

Fonte: NBR10004 – Resíduos Sólidos/1987

#### 4.3.6. Análise química

Foram realizadas análises químicas em diferentes amostras. A primeira com uma amostra completa (laminado e componentes) contendo todos os tipos de placas, e as demais análises nos

diferentes tipos de placas. Foram realizadas análises de alguns metais, a fim de determinar a concentração presente na amostra. Na segunda bateria de análises químicas foi feita a separação por densidade, determinando-se assim quais os metais e sua quantidade que realmente se concentram na fração pesada. Na terceira etapa, foram realizadas as análises dos lixiviados, solubilizados e massa bruta, também na placa completa, a fim de fazer sua classificação quanto a periculosidade.

Em todas as análises, com exceção dos extratos lixiviados, solubilizados e massa bruta, o procedimento de preparação das amostras foi o mesmo: pesava-se 3 gramas da amostra e colocava-se água régia (3HCl : 1 HNO<sub>3</sub>), aquecia-se até o ponto de ebulição e em cerca de 10 minutos toda a fração metálica estava digerida (Richter, Lorenz e Bahadir, 1997). Filtrava-se e então fazia-se diluições de acordo com o elemento a ser analisado e o método de análise empregado.

As análises químicas foram realizadas utilizando-se vários métodos: absorção atômica, IC plasma, cromatografia iônica e outras técnicas indicadas na tabela 26. Essa variação de método ocorre devido ao elemento analisado e também ao limite de detecção de cada método.

**Tabela 26 – Determinações e técnicas utilizadas nas análises químicas**

Determinação	Técnica analítica
Al, As, Ba, Cd, Pb, Cu, Cr total, Mn, Hg, Ag, Se, Na, Fe, V, Be e Zn	IC Plasma
Cr hexavalente	colorimetria com difenil-carbazida
Índice de fenóis	método CETESB L5.125
Dureza cálcio / total	volumetria de complexação com EDTA
Fluoreto, cloreto, nitrato, sulfato	cromatografia iônica
Surfactantes	método CETESB L5.122
Cianeto	Kit colorimétrico Ref. K3810 Chemits
Hidrocarbonetos totais (óleos e graxas)	gravimetria
pH	potenciometria direta

- ***Espectrofotometria de Absorção Atômica*** - a espectrofotometria de absorção atômica baseia-se na absorção de energia radiante por átomos neutros, não excitados, no estado gasoso. Uma certa espécie atômica, neutra e no estado fundamental, é capaz de absorver as radiações com comprimentos de onda iguais aos que ela emite quando excitada aos níveis energéticos mais altos. Na absorção atômica, o elemento a ser determinado é levado à condição de uma dispersão atômica gasosa, através da qual se faz passar um feixe de radiação com comprimento de onda que possa ser convenientemente absorvido. A lâmpada de catodo oco é a fonte de radiação mais usada. É uma técnica sensível que permite a determinação de microquantidades de um elemento metálico numa determinada amostra (Skoog, Holler e Nieman, 1998).
- ***Plasma Indutivamente Acoplado – ICP*** - o plasma é um gás altamente energizado. Sua formação ocorre em função de um fluxo de gás, normalmente argônio, que atravessa uma região onde se encontra uma bobina de indução, alimentada por um sistema gerador de rádiofrequência. A bobina de indução pode se apresentar com 2 a 4 espiras e refrigerada internamente por um fluo de água. Por definição, quando se aplica corrente elétrica em uma bobina, é criado um campo magnético. Por este campo magnético passa o fluxo de gás. Uma centelha de Tesla libera uma descarga de elétrons no fluxo de gás, tornando o mesmo condutivo, antes que este alcance o campo magnético. Quando o gás condutivo com a descarga de elétrons chega ao início do campo magnético, as partículas eletricamente carregadas, ions e elétrons, são acelerados no campo magnético oscilante e ocorre um processo de aquecimento por colisões entre as espécies existentes. Este aquecimento pode atingir 10.000K, garantindo a completa atomização da amostra injetada e gerando um espectro atômico extremamente rico em comprimentos de onda de interesse analítico. O plasma é instantaneamente formado e mantido, na forma toroidal, enquanto o fluxo de gás e a alimentação da bobina de indução permanecem constantes. Na teoria, todos os elementos da tabela periódica podem ser analisados por ICP, mas na prática há restrições, não podendo ser analisados elementos produzidos artificialmente, gases inertes e oxigênio, devido a suas propriedades físicas e espectrais. A alta temperatura produzida pelo ICP possibilita a determinação de modo extremamente sensível de alguns elementos que, normalmente, apresentam grandes dificuldades em outras técnicas analíticas, como metais refratários, terras raras e elementos leves, como o boro. Um grupo complexo de eventos deve ocorrer para converter o material dissolvido pela digestão da amostra até a emissão de átomos livres e íons no plasma. No final do estágio ocorre emissão de luz, que é

quantificada pelo detector do instrumento. Por definição o plasma é um fluxo gasoso formado por ions, átomos e seus elétrons em estado altamente energizado mantido por um fluxo constante de argônio e pelo campo magnético gerado numa bobina de indução (Cienfuegos e Vaitsman, 2001).

- **Colorimetria** - a técnica de colorimetria é aplicada com a utilização de fotocolorímetros capaz de medir a quantidade de luz transmitida quando um raio luminoso incide numa solução colorida de concentração conhecida ou desconhecida. Esta luz se transforma em energia elétrica mediante o emprego de células fotoelétricas ou de células fotovoltaicas capazes de ceder elétrons em forma proporcional à intensidade do feixe luminoso. O anodo capta os elétrons emitidos e é medido em um galvanômetro (Cienfuegos e Vaitsman, 2001).
- **Volumetria** - Em uma análise volumétrica, a quantidade de um constituinte de interesse (amostra) é determinada através da reação desta espécie química com uma outra substância em solução-padrão, cuja concentração é exatamente conhecida. Sabendo-se qual a quantidade da solução-padrão necessária para reagir totalmente com a amostra e a reação química que ocorre entre as duas espécies, tem-se condições para se calcular a concentração da substância analisada (Baccan et al., 2001).
- **Cromatografia Iônica** - é uma técnica analítica que permite separações, identificações e medidas quantitativas de componentes de uma mistura praticamente impossíveis de serem efetuadas pelos meios convencionais. Na cromatografia iônica a fase estacionária é altamente carregada, sendo que solutos com cargas de sinais contrários a esta são seletivamente adsorvidos da fase móvel. Os solutos adsorvidos podem ser subsequentemente eluídos, por deslocamentos com outros íons, com o mesmo tipo de carga, porém com maior força de interação com a fase estacionária. Os diferentes graus de afinidade eletrostática entre o trocador de íons da fase móvel regem este tipo de cromatografia. A separação de materiais por cromatografia por troca iônica está baseada na adsorção reversível e diferencial dos íons da fase móvel pelo grupo trocador da matriz. A diferença de afinidade entre os íons da fase móvel e a matriz é devido a diferenças de carga, sendo possível controlá-la utilizando fatores como o pH e a força iônica. (Collins, Braga e Bonato, 1997).

- **Gravimetria** - o método baseia-se na precipitação, a solução que contém a substância a ser analisada é mantida sob agitação enquanto o reagente precipitante é adicionado lentamente. Mesmo com essa precaução ainda ocorrem zonas de altas concentrações locais, que provocam o aparecimento de inúmeros cristais de pequeno tamanho, de difícil filtração. É necessário então que o precipitado assim obtido seja submetido a um processo de digestão, de modo a obter-se cristais maiores (Bacan et al., 2001).
- **Potenciometria** - os métodos empregados na análise potenciométrica baseiam-se na medida da força eletromotriz de uma pilha ou célula galvânica constituída pela associação de dois eletrodos: um de referência e outro indicador. O eletrodo de referência é aquele que possui potencial estável e reproduzível em relação à solução e eletrodo indicador, também denominado de trabalho, o que apresenta potencial variável, dependendo da atividade da espécie química na solução. A célula é constituída de duas lâminas metálicas, uma de zinco e outra de cobre, imersas em soluções de sulfato de zinco e de sulfato de cobre, respectivamente. As soluções se comunicam através de ponte salina preparada com solução saturada de cloreto de potássio. As lâminas são ligadas entre si por um condutor externo e para cada metal estabelece-se um potencial de eletrodo (Cienfuegos e Vaitzman, 2001).

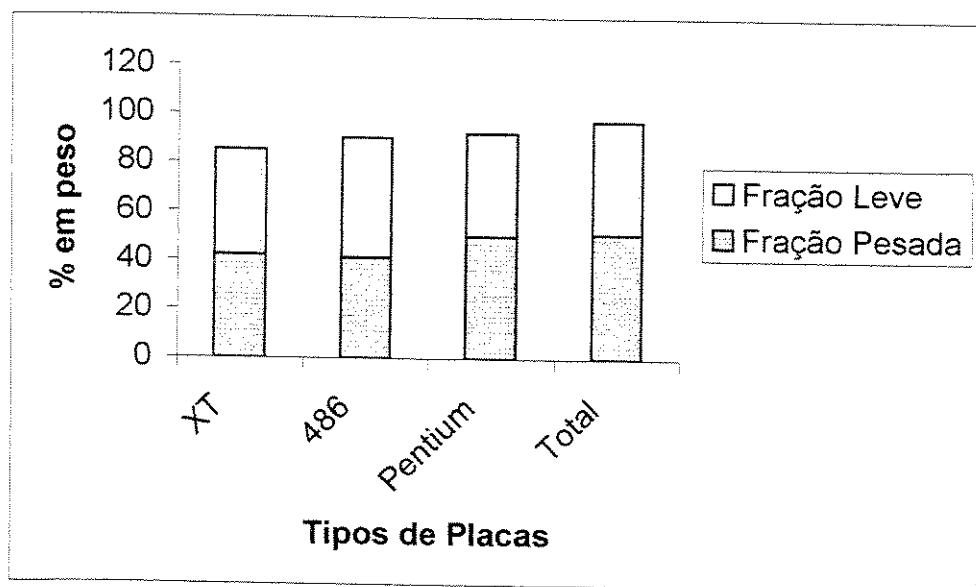
## **Capítulo 5**

### **Resultados e Discussões**

No presente trabalho, para a caracterização e classificação das placas de circuito impresso, foram utilizados placas descartadas de diferentes tipos. As amostras foram analisadas pelas técnicas descritas anteriormente, sendo que o poder calorífico e a análise imediata foram realizados no laboratório didáticos do DETF/ FEM/ UNICAMP, a análise elementar foi realizada na Central Analítica do Instituto de Química, e a análise de concentração de metais por Absorção Atômica foram realizados no laboratório do DEMA / FEM / UNICAMP. As demais análises foram realizadas pelo laboratório de análises químicas T&E Analítica Ltda.

#### **5.1. Separação por densidade**

O resultado apresentado na figura 5 corresponde à porcentagem de material que decanta e que flutua quando adicionamos 2 g do resíduo dentro do funil de separação com o líquido de densidade intermediária ( $\text{CHBr}_3$ ). O ensaio foi realizado em quatro diferentes tipos de amostras: amostra 1 –XT, amostra 2 – 486, amostra 3 – Pentium e amostra 4 – todos os tipos de placas.



**Figura 5 – Porcentagem de material separado de placas de circuito impresso em contato com CHBr<sub>3</sub> (densidade 2,89g.cm<sup>-3</sup>)**

Com a fração leve (materiais cerâmicos, plásticos) foram realizadas análises imediata, elementar e a determinação do poder calorífico. As frações pesadas (metais) foram analisadas quimicamente e obteve-se a percentagem de seus principais componentes.

O objetivo principal da separação por densidade, contudo, foi a separação da fração metálica, pois, em análises realizadas anteriormente em amostras contendo esta fração, não foi possível obter resultados para caracterização do resíduo. Em análises realizadas contendo a fração metálica ocorreu a formação de óxidos metálicos interferindo assim nos resultados de determinação do poder calorífico e a análise imediata.

## 5.2. Análise imediata, elementar e poder calorífico

Amostras da fração leve das placas de circuito impresso foram caracterizadas como combustível e resíduo, efetuada a análise imediata, elementar e a determinação do poder calorífico. Os resultados se encontram nas Tabela 27, 28, 29 e 30.

**Tabela 27 – Resultados da análise imediata contendo frações de todos os tipos de placas**

<b>Análise Imediata da fração leve das placas de circuito impresso (resultados expressos em porcentagem Base Seca)</b>				
<b>Amostra</b>	<b>Umidade</b>	<b>Voláteis</b>	<b>Carbono Fixo</b>	<b>Cinzas</b>
1	0,54	38,01	2,97	59,02
2	0,43	39,14	2,51	58,34
3	0,58	41,58	2,21	56,21
4	0,80	42,08	1,81	56,11
5	1,00	38,57	2,29	59,13
6	1,15	39,70	2,46	57,84
7	1,19	38,94	2,37	58,69
8	1,29	39,83	2,32	57,85
<b>Média</b>	<b>0,87</b>	<b>39,85</b>	<b>2,38</b>	<b>57,78</b>

Análises realizadas no Laboratório Didático - DETF - FEM - UNICAMP

**Tabela 28 – Resultado da análise elementar contendo frações de todos os tipos de placas**

<b>Análise Elementar da fração leve das placas de circuito impresso (% massa)</b>		
<b>Carbono</b>	<b>Hidrogênio</b>	<b>Nitrogênio</b>
$28,0 \pm 1,64$	$2,33 \pm 0,21$	$0,90 \pm 0,12$

\* Valores expressos são média e desvio padrão

Análises realizadas pela Central Analítica - IQ - UNICAMP

**Tabela 29 – Resultado do poder calorífico contendo frações de todos os tipos de placas**

<b>Determinação do poder calorífico superior da fração leve das placas de circuito impresso</b>	
<b>Amostra</b>	<b>Hs (MJ/kg)</b>
1	12,04
2	11,45
3	10,95
4	11,26
5	11,78
6	12,30
<b>Média</b>	<b>11,63</b>

Análises realizadas no Laboratório Didático - DETF - FEM - UNICAMP

**Tabela 30 – Resultado do poder calorífico inferior contendo frações de todos os tipos de placas**

Determinação do poder calorífico inferior da fração leve das placas de circuito impresso	
Poder calorífico Inferior	
H	2,33%
Hs	11,63
Hi	<b>11,13</b>

No conjunto de total de amostras utilizadas, a fração leve representou 46% da massa de sucata. Considerando que a fração pesada constituiu-se de metais e cerâmicas (não combustíveis), na tabela 31 são apresentados os valores da análise imediata e poder calorífico corrigidos para a fração total das placas e componentes.

**Tabela 31 – Caracterização das placas de circuito impresso (laminado e componentes) - fração leve e pesada**

Análise Imediata das placas de circuito impresso (resultados expressos em porcentagem Base Seca)				Poder Calorífico Superior (MJ/kg)	Poder Calorífico Inferior (MJ/kg)
Umidade	Voláteis	Carbono Fixo	Cinzas		
0,37	16,70	0,99	82,27	4,88	4,68

Para efeito de comparação apresentamos, na Tabela 32, dados típicos de outros combustíveis e resíduos. Os resultados mostram que o laminado (fração leve) das placas de circuito impresso tem médio teor de voláteis, tem poder calorífico razoável e possui alto teor de cinzas. Por sua vez, a fração total (laminados e componentes), possui características indesejáveis como combustível, devido ao teor de cinzas, metais e baixo poder calorífico. Como resíduo, não seria indicado para tratamentos térmicos, tais como incineração e pirólise, devido as características acima mencionadas, e possível emissão de metais pesados como poluentes atmosféricos.

**Tabela 32 – Caracterizações típicas de alguns materiais combustíveis**

<b>Material</b>	<b>Umidade</b>	<b>Voláteis (%)</b>	<b>Carbono Fixo (%)</b>	<b>Cinzas (%)</b>	<b>Poder calorífico inferior (MJ/kg )</b>
Eucalipto	16,0	81,42	17,82	0,79	19,42
Bagaço de cana	45,0	73,78	14,95	11,27	17,33
Carvão vegetal	3,4	7	92	1	32,02
Separador de bateria (polietileno)	2,22	4,24	48,81	46,94	22,08
Laminado placas de circuito impresso	0,87	39,85	2,38	57,78	11,14
Placa de circuito impresso	0,37	16,70	0,99	82	4,68

Fonte: Sanchez, 1994, Behainne, 1999, Ravaglia, 1965 e Machado, 2002

### **5.3. Caracterização do Resíduo – Lixiviação e Solubilização**

Para a classificação do resíduo de acordo com a norma brasileira NBR 10004, foram realizados ensaios de lixiviação (NBR 10005), solubilização (NBR 10006) e determinações sobre a massa bruta. Os ensaios foram realizados pelo laboratório de análises químicas T&E Analítica Ltda.

Os limites de detectabilidade apresentados na tabela 33 foram os necessários para atingirem os valores da legislação. Os resultados analíticos são mostrados nas Tabelas 34, 35 e 36.

**Tabela 33 – Limites de detectabilidade**

Determinação	Limites de detectabilidade (mg/kg)
Al, Ba, Cu, Cr total, Mn, Na, Fe, V, Be e Zn	0,01
Pb, Ag, As e Se	0,01
Hg, Cd	0,001
Cr hexavalente	0,05
Índice de fenóis	0,001
Dureza cálcio / total	10
Fluoreto, cloreto, nitrato, sulfato	0,2
Surfactantes	0,01
Cianeto	0,01
Hidrocarbonetos totais (óleos e graxas)	500

**Tabela 34 – Resultados fisico-químicos - Lixiviado**

Determinação	Resultado (mg/l) (a)	Limites (mg/l) (a)
Arsênio	N.D.	5,0
Cádmio	22,0	0,5
Chumbo	133	5,0
Bário	1,5	100
Cromo Total	0,05	5,0
Selênio	N.D.	1,0
Prata	0,02	5,0
Mercúrio	N.D.	0,1
Fluoreto	N.D.	150

*Observações:* (a) – valores indicados nos Anexos G,H,I e J da NBR 10004

ND = Não Detectado aos limites expressos.

Análises realizadas pelo laboratório de análises químicas T&E Analítica Ltda

**Tabela 35 – Resultados físico-químicos – Solubilizado**

Determinação	Resultado (mg/l) (a)	Limites (mg/l) (a)
Índice de Fenóis	0,2	0,001
Sufactantes	0,03	0,2
Arsênio	N.D.	0,005
Cádmio	1,1	0,005
Chumbo	0,7	0,05
Bário	0,3	1,0
Cromo Total	0,04	0,05
Sódio	1,7	200
Manganês	0,06	0,1
Selênio	N.D.	0,01
Prata	0,01	0,05
Ferro	0,3	0,3
Cobre	1,3	1,0
Mercúrio	N.D.	0,001
Zinco	0,2	5,0
Alumínio	0,3	0,2
Nitrato (como N)	N.D.	10
Fluoreto	N.D.	1,5
Cianetos	N.D.	0,1
Sulfatos	2,0	400
Cloreto	6,2	250
Dureza (em CaCO <sub>3</sub> )	10,3	500

*Observações:*(a) – valores indicados nos Anexos G,H,I e J da NBR 10004

ND = Não Detectado aos limites expressos.

Análises realizadas pelo laboratório de análises químicas T&E Analítica Ltda

**Tabela 36 – Resultados físico-químicos – Massa bruta**

Determinação	Resultado (mg/kg) (b)	Limites (mg/kg) (a)
Umidade	1,7 g/100g	---
Índice de Fenóis	1,3	10
pH (solução 10%)	5,8	2 – 12,5
Berílio	N.D.	100
Arsênio	N.D.	1000
Chumbo	31000	1000
Cromo IV	N.D.	100
Vanádio	N.D.	1000
Selênio	N.D.	100
Mercúrio	N.D.	100
Cianetos	N.D.	1000
Óleos e Graxas	200	5,0%

*Observações:*(a) – valores indicados nos Anexos G,H,I e J da NBR 10004

(b) – valores indicados sobre base seca

ND = Não Detectado aos limites expressos.

Análises realizadas pelo laboratório de análises químicas T&E Analítica Ltda.

Baseando-se nos resultados analíticos físico-químicos obtidos e no procedimento classificatório sugerido pela NBR 10004, conclui-se que as placas de circuito impresso devem ser classificadas como resíduos Classe I (resíduo perigoso).

Considerando as três fases analíticas de lixiviado, solubilizado e massa bruta os itens chumbo e cádmio no lixiviado colocam o resíduo em estudo, de acordo com a NBR 10004, como sendo classe de risco 1 (resíduo perigoso). Além disso, os itens índice de fenóis, cádmio, chumbo, cobre e alumínio no solubilizado se encontram acima dos limites máximos permitidos, para classificá-lo como inerte, caso não houvesse já sido classificado como perigoso.

## 5.4. Análise química

Com as amostras de placas de circuito impresso, digeridas com água-régia, foram feitas análises químicas que estão apresentadas nas tabelas 37 e 38.

**Tabela 37 – Análise química das placas de circuito impresso – Frações leve e pesada**

Elemento	XT (mg/kg)	486 (mg/kg)	Pentium (mg/kg)	Amostra de todos os tipos (mg/kg)
Ag	642	283	340	317
Au	218	633	366	142
Cd	2.375	2.283	1.033	1183
Cu	37.817	37.017	24.000	42.283
Fe	568	19.500	34.433	30.783
K	233	680	90	180
Mn	337	3.543	4.377	81
Na	317	413	1.350	4.833
Ni	12.717	16.608	21.230	4.142
Zn	2.558	1.992	2.167	1.825
Pb	51.083	22.750	42.000	25.000
<sup>(a)</sup> Si	22	47	60	-
<sup>(b)</sup> As	37	46	20	11
<sup>(b)</sup> Ca	7.730	1.264	1.197	1.696
<sup>(b)</sup> Sb	301	142	315	505
<sup>(b)</sup> Se	7	20	9	21
<sup>(b)</sup> Sn	11.915	68.274	64.313	47.863

Análises realizadas no Laboratório de Engenharia Eletroquímica - DEMA - FEM - UNICAMP

<sup>(a)</sup> Análise realizada pelo laboratório de análises químicas T&E Analítica Ltda.

<sup>(b)</sup> Análises realizadas no laboratório de controle de qualidade da indústria Baterias Tudor/MG

**Tabela 38 – Análise química das placas de circuito impresso – Fração pesada**

Elemento	XT (mg/kg)	486 (mg/kg)	Pentium (mg/kg)	Amostra de todos os tipos (mg/kg)
Ag	483	483	383	333
Au	229	200	150	126
Cd	1.425	1.016	1.083	1.091
Cu	5.983	16.500	13.650	11.575
Fe	7.508	11.542	22.283	21.467
K	663	290	703	203
Mn	2.253	607	4.720	34
Na	1.267	1.037	1.090	1.120
Ni	3.867	4.775	11.542	1.933
Zn	767	1.383	558	592
Pb	13.250	19.416	12.666	13.150
<sup>(a)</sup> As	5	6	15	7
<sup>(a)</sup> Ca	19.338	11.025	11.748	11.875
<sup>(a)</sup> Sb	1.889	2.653	2.113	2.196
<sup>(a)</sup> Se	11	5	13	12
<sup>(a)</sup> Sn	17.675	25.029	25.146	17.880

Análises realizadas no Laboratório de Engenharia Eletroquímica - DEMA - FEM - UNICAMP

<sup>(a)</sup> Análises realizadas no laboratório de controle de qualidade da indústria Baterias Tudor/MG

Estas análises mostram grande quantidade e variedades de elementos metálicos presentes nas placas de circuito impresso, o que indica uma grande dificuldade na reciclagem destas sucatas. Analogamente dificulta também a sua disposição adequada, com alto risco de contaminação ambiental.

Com relação aos metais é interessante fazer uma comparação entre a quantidade de cada metal encontrado em placas de circuito impresso de acordo com as análises químicas e a quantidade típica do mesmo metal encontrado originalmente nos minérios. Essa comparação está indicada na tabela 41. A porcentagem média para cada elemento nas placas foi obtida através de uma média aritmética de todas

as frações das tabelas anteriores. Apesar da grande variedade de metais, alguns destes estão presentes em teores da mesma ordem de grandeza dos minérios naturais típicos.

**Tabela 39 - Porcentagem de metal encontrado em média nos minérios e nas placas de circuito impresso**

Elemento	% no minério	% fração metálica	% fração total
Cobre	0,5 – 3,0	3,53	1,19
Zinco	1,7 – 6,4	0,21	0,08
Estanho	0,2 – 0,85	4,80	2,14
Chumbo	0,3 – 7,5	3,50	1,46
Ferro	30 – 60	2,13	1,57
Níquel	0,7 – 2,0	1,37	0,55

Fonte : Veit, 2001

Foi investigado também a presença de outros compostos potencialmente tóxicos, como bromo e o cloro. Znang e Forssberg (1999), citam que uma substancial concentração de bromo foi detectada em amostras de placas de circuito impresso e Chien et al. (2000) com estudo similar encontraram valores de ordem de 5-15%.

Segundo Rahman et al. (2001), Fink et al. (2000) e Allchin, Law e Morris (1999), a presença de bromo em sucatas eletrônicas vem da grande variedade de plásticos que são tratados com retardantes de chama. Esses compostos químicos são produtos que quando adicionados aos materiais poliméricos, em caso de exposição ao fogo ou alta temperatura, devem inibir o processo de combustão, normalmente são compostos halogenados a base de cloro ou bromo.

Estes compostos são potencialmente perigosos, pois, o bromo quando colocado em contato com materiais orgânicos e tratado termicamente na faixa de temperatura entre 200 e 1500°C podem gerar dioxinas e furanos que são éteres aromáticos cíclicos halogenados (Sakai, et al., 2001 e Chien et al., 1999).

Em análises realizadas na sucata de placas de circuito impresso não foram detectados concentrações de cloro total, e foi detectado apenas bromo em forma de brometo conforme tabela 42.

**Tabela 40 – Análise de Cloro e Bromo em placas de circuito impresso – amostra de todos os tipos**

	<b>Cloro Total (mg/kg)</b>	<b>Brometo (mg/kg)</b>
Placas XT	N.D.	2,6
Placas 486	N.D.	10,9
Placas Pentium	N.D.	5,6

ND = Não Detectado aos limites expressos.

Limite de detectabilidade para Cloro total: 0,1 mg/kg

Análises realizadas pelo laboratório de análises químicas T&E Analítica Ltda.

## **Capítulo 6**

### **Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros**

Neste trabalho foi proposta uma metodologia de análise e caracterização de resíduos e sucatas de placas eletrônicas em geral, esta metodologia foi utilizada para caracterização de placas de computadores.

A metodologia proposta mostrou-se adequada, mas ainda é possível seu aprimoramento, principalmente nas etapas de homogeneização e amostragem das frações separadas e escolhidas.

Com base nos resultados obtidos nesse trabalho pode-se afirmar que de acordo com a norma brasileira NBR 10004 as placas de circuito impresso com componentes eletrônicos devem ser classificadas como resíduos perigosos, que necessitam de um tratamento especial para serem dispostos. A classificação como resíduo perigoso é devida principalmente a presença de chumbo e cádmio lixiviável.

A análise do lixiviado indica um grande potencial de contaminação do solo, águas subterrâneas e superficiais, por metais pesados (chumbo e cádmio), se a sucata de placas e componentes forem dispostas em aterros ou lixões. Nestes casos, a percolação do chorume , o ambiente de baixo pH e o grande tempo de exposição propiciam alto risco de lixiviação de metais pesados.

Os resultados mostram que o laminado (fração leve) das placas de circuito impresso tem médio teor de voláteis (39,85%), tem poder calorífico razoável (11,63 MJ/kg) e possui alto teor de cinzas (57,78%). Por sua vez, a fração total (laminados e componentes), possui características indesejáveis

como combustível, devido ao teor de cinzas (82,27%), metais e baixo poder calorífico (4,88 MJ/kg). Como resíduo, não seria indicado para tratamentos térmicos, tais como incineração e pirólise, devido as características acima mencionadas, e possível emissão de metais pesados como poluentes atmosféricos.

De acordo com as análises químicas realizadas podemos afirmar que a sucata de placas de circuito impresso é matéria prima interessante, pois apresenta quantidades de metais que podem justificar o seu aproveitamento do ponto de vista econômico, visto que alguns podem ser recuperados. O metal que está presente em maior quantidade é o cobre, mas o chumbo e o estanho possuem uma grande participação na composição das placas analisadas. Além disso, as placas possuem metais preciosos como ouro e prata, que apesar de estar presente em pequenas concentrações, também podem ser recuperados.

Devido as características das sucatas eletrônicas, com grande potencial de contaminação ambiental, há necessidade de um sistema de gestão e controle da disposição final dos mesmos. A reciclagem dos metais destes componentes pode ser uma das soluções adequadas, porém, a tecnologia para tanto não está plenamente desenvolvida e comercialmente disponível no Brasil.

### ***Sugestões para trabalhos futuros***

- Estudar novas densidades de corte para melhorar a eficiência do processo de separação.
- Estudar métodos de homogeneização e amostragem de sólidos para melhor representatividade da análise química.
- Caracterizar mais detalhadamente a fração metálica das placas de circuito impresso e componentes, para melhor resultado no estudo da recuperação dos metais.
- Pesquisar e desenvolver métodos e processos para recuperação de metais das sucatas eletrônicas, tais como, métodos de cominuição e separação, processos hidrometalúrgicos e pirometalúrgicos.

- Avaliar impactos ambientais decorrentes das diferentes destinações de sucatas eletrônicas tais como aterros, incineração e co-processamento em fornos de cimento, etc.
- Estudar e propor métodos de gestão da destinação final e pós-consumo de aparelhos eletrônicos, envolvendo inclusive a responsabilidade de fabricantes e importadores.

## **Referências Bibliográficas**

- Abtew, M., Selvaduray, G. Lead-free Solders in Microelectronics. *Reports: A Review Journal*, v. 27, p.95-141, february 2000.
- Alloway, B. J. Heavy Metals in Soils. Blackie Academic & Professional. Second Edition. 1995. p. 38-56.
- Associação Brasileira de Circuitos Impressos – ABRACI. Placas de Circuito Impresso. Maio. 2001. Disponível em: <http://www.abracci.org.br>. Acesso em 21 dezembro 2001.
- Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica - ABINEE. Dados Econômicos. Disponível em: <http://www.abinee.org.br/abinee/decon/decon10.htm>. Acesso em: 25 novembro 2001.
- Allchin, C. R., Law, R. J., Morris, S. Polybrominated diphenylethers in sediments and biota downstream of potential sources in the UK. *Environmental Pollution*, v.105, p.197-207, november 1999.
- American Society for Testing and Materials. ASTM D 240-92: Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels By Bombs Calorimeter. Philadelphia, 1995. 8 p.
- American Society for Testing and Materials. ASTM D 3172-89: Standard Test Method for Proximate Analysis of Coal and Coke. Philadelphia, 1989. 1 p.
- American Society for Testing and Materials. ASTM D 3173-87: Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke. Philadelphia, 1987. 2 p.

American Society for Testing and Materials. ASTM D 3174-93: Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal. Philadelphia, 1993. 4 p.

American Society for Testing and Materials. ASTM D 3175-89a: Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke. Philadelphia, 1989. 3 p.

American Society for Testing and Materials. ASTM D 3176-89: Standard Test Method for Ultimate Analysis Sample of Coal and Coke. Philadelphia, 1989. 3 p.

Anuário de Informática Hoje. Radiografia Anual do Mercado de Informática. Disponível em: <http://www.informaticahoje.com.br/plano/ih/especial/mercado.htm>. Acesso em: 25 novembro 2001.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. NBR 10004: Resíduos Sólidos, Rio de Janeiro, 1987. 48 p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. NBR 10005: Lixiviação de Resíduos, Rio de Janeiro, 1987. 7 p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. NBR 10006: Solubilização de Resíduos, Rio de Janeiro, 1987. 2 p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. NBR 10007: Amostragem de Resíduos , Rio de Janeiro, 1987. 12 p.

Baccan, N., Andrade, J. C., Godinho, O. E. S., Barone, J. S. Química Analítica Quantitativa Elementar. 3<sup>a</sup> edição. 2001. 308 p.

Baere, D. Anaerobic Digestion of Solid Waste: state of the art. *Water Science & Technology*. v. 41, n. 3. P. 283-290, 2000.

Balderrama, Lupe M. B. Estudo de Impacto Ambiental causado por aterro sanitário via migração de gases. Tese de Mestrado. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 1993. 113f.

Bernardes, A. et al. Recycling of Printed circuit boards by melting with oxidising/reducing top blowing process. In TMS Annual Meeting, Orlando, EUA, p. 363-375, 1997.

Borsoi, Z. et al. Resíduos Sólidos. Informe Infra-Estrutura, nº12, Julho 1997. Disponível em: <http://www.bnbes.gov.br/conhecimento/publicacoes/catalogo/informe.asp#saneamento>. Acesso em: 25 junho 2002.

Brummeller, Aarnink. Dry Anaerobic Digestion of Solid Organic Waste in a Biocel reactor at Pilot-Plant Scale. *Water Science and Technology*. v. 25, n. 7. p. 301-310. 1992.

Carvalho, Bejamim A. Ecologia Aplicada ao Saneamento Ambiental. Rio de Janeiro. ABES, 1980.

Ceolato, Luiz. Análise Econômica, Ambiental e Legislação sobre Lixo Tecnológico, Pilhas e Baterias. In: Seminário de Reciclagem de Metais Não-Ferrosos. Associação Brasileira de Metais-ABM, São Paulo, 2000, p. 113-119.

CETESB, Apostilas Ambientais – Resíduos Sólidos Domiciliares e de Serviços de Saúde – Tratamento e Disposição Final, São Paulo, 1997.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Resíduos Sólidos. Disponível em: [http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/solo\\_inventario.htm](http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/solo_inventario.htm). Acesso em: 06 junho. 2002.

Chien, Y. C. et al. Fate of bromine in pyrolysis of printed circuit board wastes. *Chemosphere*, v.40, p.383-387, june 1999.

Chien, Y. C. et al. Oxidation of printed circuit board wastes in supercritical water. *Water Research*, v.34, n.17, p.4279-4283, february 2000.

Cienfuegos, F., Vaitsman, D. Análise Instrumental. Editora Interciênciac. 2001, 606 p.

Collins, C. H., Braga, G. L., Bonato, P. S. Introdução a Métodos Cromatográficos. Editora da Unicamp. 1997, p.72-94.

Daskalopoulos, E., Badr, O., Probert, S. D. Economic and Environmental Evaluations of Waste Treatment and Disposal Technologies for Municipal Solid Waste. *Applied Energy*, v.58, n.4, p.209-255, 1997.

Dempsey, C.R. e Oppelt, E.T. Incineração de Resíduos Perigosos: Uma Revisão Crítica. São Paulo, 1999. p. 1-23.

Felix, N., Riet, C. V. Recycling of Eletronic scrap at um's hoboken smelter. In: International Precious Metals Conference, Vancouver, Canada, p. 159-169, 1994.

Figueiredo, P. J. M. *Os Resíduos Sólidos e sua Significação Frente ao Impasse Ambiental e Energético da Atualidade*. Campinas, 1992. 227 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.

Fink, H. et al. Determination of metal additives and bromine in recycled thermoplasts from electronic waste by TXRF analysis. *Fresenius Journal Analytical Chemistry*, v.368, p.235-239, march 2000.

Fthenakis, V. M. End-of-life management and recycling of PV modules. *Energy Policy*, v.28, p.1051-1058, may 2000.

Gandolla, M., Dugnani, L. Gli impianti di incenerimento in Europa: Esperienze e tendenze impiantistiche e gestionali. Atti del Covegno internazionale. *Incenerimento e recupero di energia dai R.S.U.* Palermo, Italia, 1990.

Gupta, S. M., McLean, C. R. Disassembly of Products. *Computers & Industrial Engineering Computers*, v.31, n.1/2, p.225-228, 1996.

Kompac - Energia e Meio Ambiente. Pirólise. Disponível em: [www.kompac.com.br/publicações/pirólise.htm](http://www.kompac.com.br/publicações/pirólise.htm). Acesso em: 07/05/2001, 14:25.

Higesa, J. P. Estudo de Impacto Ambiental dos Aterros Sanitários de Prado, Alcobaça e Caravelas. Salvador: CONDER/HIGESA, 2000.

Hoffmann, J. E. Recovering precious metals from electronic scrap. *Journal of Minerals, Metals and Materials Society*, July, 1992.

Instituto de Pesquisas Tecnológicos – IPT. Manual de Gerenciamento Integrado. 1995. Disponível em:  
<http://www.ipt.br>. Acesso em 05 maio 2002.

Kopacek, B., Kopacek, P. Intelligent Disassembly of Electronic Equipment. *Annual Reviews in Control*, v.23, p.165-170, 1999.

Kugler, M. Processos de Fabricação e Montagem de Placas de Circuito Impresso. Disponível em:  
[http://mauricio.kugler.com/pcb/processos\\_de\\_fabric\\_e\\_mont.htm](http://mauricio.kugler.com/pcb/processos_de_fabric_e_mont.htm). Acesso em 10 outubro 2002.

Lee, C. H. et al. Management of scrap computer recycling in Taiwan. *Journal Hazardous Materials*, v.A73, p.209-220, april 1999.

Lopes, W. Silva et al. Avaliação de Impactos Ambientais causados por lixões: Um estudo de Caso.  
XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Alegre, 2000.

Machado, A. V., Prata Filho, D. Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos em Niterói. XX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro. 1999.

MacFaland, J. M. et al. Comprehensive studies of solid waste management. Environmental Protection Agency, 1972

Mallan, G. M. e Finney, C. S. New techniques in the pyrolysis of solid wastes, Minnesota, 1972.

Melo, P. R. S., Rios, E. C. D., Gutierrez, R. M. V. Placas de Circuito Impresso: Mercado Atual e Perspectivas. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 14, Set. 2001. p.111-136.

Menetti, R. P., Tenório, J. A. S. Reciclagem de metais preciosos a partir de sucata eletrônica. Metalurgia e Materiais, v.52, n.457, p.531-534, setembro 1996.

Menetti, R. P.; Chaves, A. P.; Tenório, J. A. S. Obtenção de Concentrados Metálicos Não Ferrosos a partir de Sucata Eletrônica. In: 51º Congresso Anual da ABM, 1996 (a), Porto Alegre, v. 4, p.205-217.

Menetti, R. P.; Chaves, A. P.; Tenório, J. A. S. Recuperação de Au e Ag de Concentrados Obtidos a partir de Sucata Eletrônica. In: 51º Congresso Anual da ABM, 1996 (b), Porto Alegre, v. 4, p.17-18.

Musson, S. E. et al. Characterization of Lead Leachability from Cathode Ray Tubes Using the Toxicity Characteristic Leaching Procedure.. *Environmental Science & Technology*, v.34, n.20, p. 4376-4381. 2000.

Ochiai, I. Environmental protection in the electronic and electrical industries. *Journal of Materials Processing Technology*, v.59, p.233-238. 1996.

Rahman, F. et al. Polybrominated diphenyl ether (PBDE) flame retardants. *The Science of the Total Environment*, v.275, p.1-17, april 2001.

Ravaglia, E., Projeto de um gerador de vapor de água. USP. Departamento de Livro e Publicações do Grêmio Politécnico.1965.

Reciclagem 2000. Disponível em: [www.geocities.com/reciclagem2000](http://www.geocities.com/reciclagem2000). Acesso em 07/05/2001, 15:32.

Richter, H., Lorenz, W., Bahadir, M. Examination of organic and inorganic xenobiotics in equipped printed circuits. *Chemosphere*, v.35, n.1/2, p.169-179, 1997.

Rocca, Alfredo Carlos C., Resíduos Sólidos Industriais. CETESB, 1992.

Ron, A. , Penev, K. Disassembly and recycling of electronic consumer products: an overview. Technovation. vol. 15. nº 6. p. 363-374. 1995.

Saito, Isamu. Recovery of valuable metals from printed wiring board wastes. Trans. Mat. Res. Soc. Japão, v. 18A, p. 207-214, 1994.

Sá, F. A. P., Brakarz, J., Silva, R. Manual de Tratamento e Disposição de Lixo. Rio de Janeiro: Centro de Estudos e Projetos do Ibama, 1987, p.5-37.

Sakai, S. I. et al. Combustion of brominated flame retardants and behavior of its byproducts. *Chemosphere*, v.42, p.519-531, 2001.

Shih, L. H. Reverse logistics system planning for recycling electrical appliances and computers in Taiwan. *Resources, Conservation and Recycling*, v.32, p.55-72. 2001.

Skoog, A. D., Holler, F. J., Nieman. Principles of Instrumental Analysis. Saunders College Publishing, Fifth Edition, 1998. 849 p.

Stuart, J., Lu, Q. A Model for Discrete Processing Decisions for Bulk Recycling Of Electronics Equipment. *IEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, v.23, n.4, october, 2000.

Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S.A. Integrating Solid Waste Management. New York: Mac Graw – Hill, 1993, 978 p.

Teixeira, E. N. Minimização de Resíduos Domésticos. CEMPRE – Compromisso Empresarial para Reciclagem. Cempre Informa, nº 63, Maio/Junho 2002 <<http://www.cempre.org.br>>. Acesso em: 22 junho 2002.

Teixeira, E. N. Resíduos Sólidos: Minimização e Reaproveitamento Energético. Seminário Nacional sobre Reuso/Reciclagem de Resíduos sólidos Industriais. São Paulo, 2000.

Theodore, L; Reynolds, J. Introduction to hazardous waste incineration. New York: John Wiley & Sons, 1987. Part. 7 – Incinerators, p. 247-258.

Torreira, R. P. Geradores de Vapor. São Paulo. Companhia Melhoramentos, 1995. 710 p.

United States Environmental Protection Agency (Epa). Treatment Technologies, Inc. 2th Ed. Local: Government Institutes, 1991. p. 41-59.

Veit, H. M. Emprego do Processamento Mecânico na Reciclagem de Sucatas de Placas de Circuito Impresso. Porto Alegre, 2001.96 f. Tese (Mestrado) Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Vrancken, K. C. et al. Petrography and Leaching: Complementary Tools in Assessing the Environmental Risks of Secondary Raw Materials. In REWAS, San Sebastian, Spanish, p. 1373-1380. September. 1999.

Zhang, S., Forssberg, E. Intelligent Liberation and Classification of electronic scrap. *Powder Technology*, v.105, p. 295-301, 1999.

Yang, J., Sieben, C. Environmental challenges in computer manufacturing. *Environment International*, v.27, p.49-59, april 2001.

## **Apêndices**

Apêndice A – Análise Imediata

Apêndice B – Determinação do Poder Calorífico

## Apêndice A - Análise Imediata

**Quadro 1A – Resultado da Análise Imediata das amostras de placas de circuito impresso.**

	1	2	3	4	5	6	7
	PESO CADINHO (g)	PESO AMOSTRA ÚMIDA E CADINHO (g)	PESO AMOSTRA SECA E CADINHO (g)	PESO CARBONO E CADINHO (g)	PESO CINZAS E CADINHO (g)	PESO AMOSTRA ÚMIDA (g)	PESO AMOSTRA SECA (g)
						(2 – 1)	(3 – 1)
AMOSTRA 1	32,3622	33,4600	33,4541	33,0390	33,0066	1,0978	1,0919
AMOSTRA 2	32,8211	33,8363	33,8320	33,4363	33,4109	1,0152	1,0109
AMOSTRA 3	32,9397	33,9497	33,9439	33,5264	33,5042	1,0100	1,0042
AMOSTRA 4	32,1055	33,1112	33,1032	32,6834	32,6653	1,0057	0,9977
AMOSTRA 5	28,4631	29,4712	29,4612	29,0762	29,0533	1,0081	0,9981
AMOSTRA 6	27,8712	28,8817	28,8702	28,4736	28,4490	1,0105	0,9990
AMOSTRA 7	37,2882	38,2977	38,2858	37,8973	37,8737	1,0095	0,9976
AMOSTRA 8	36,7024	37,7157	37,7028	37,3043	37,2811	1,0133	1,0004

	8	9	10	11	12	13	
	PESO CARBONO MAIS CINZAS (g)	PESO CINZAS (g)	UMIDADE (% b.s)	CARBONO (% b.s)	VOLÁTEIS (% b.s)	CINZAS (% b.s)	
	(4 – 1)	(5 – 1)	(6 – 7) / 7	(8 – 9) / 7	(7 – 8) / 7	(9 / 7)	
AMOSTRA 1	0,6768	0,6444	0,5403	2,9673	38,0163	59,0164	
AMOSTRA 2	0,6152	0,5898	0,4254	2,5126	39,1433	58,3440	
AMOSTRA 3	0,5867	0,5645	0,5776	2,2107	41,5754	56,2139	
<b>MÉDIA</b>			<b>0,5144</b>	<b>2,5635</b>	<b>39,5783</b>	<b>57,8581</b>	
AMOSTRA 4	0,5779	0,5598	0,8018	1,8142	42,0768	56,1091	
AMOSTRA 5	0,6131	0,5902	1,0019	2,2944	38,5733	59,1324	
AMOSTRA 6	0,6024	0,5778	1,1512	2,4625	39,6997	57,8378	
<b>MÉDIA</b>			<b>0,9850</b>	<b>2,1904</b>	<b>40,1166</b>	<b>57,6931</b>	
AMOSTRA 7	0,6091	0,5855	1,1929	2,3657	38,9435	58,6909	
AMOSTRA 8	0,6019	0,5787	1,2895	2,3191	39,8341	57,8469	
<b>MÉDIA</b>			<b>1,2412</b>	<b>2,3424</b>	<b>39,3888</b>	<b>58,2689</b>	

## **Apêndice B - Medida de poder calorífico**

### **Equipamentos, materiais e reagentes**

Os equipamentos e materiais necessários para determinar o poder calorífico são: bomba calorimétrica, recipiente da bomba, banho externo, termômetros, fio de algodão, fio de ferro ou cromel, cronômetro, solução padrão de alcali 0,0725 N, padrão de ácido benzóico, indicador alaranjado ou vermelho de metila e oxigênio.

### **Padronização**

É necessário padronizar o equipamento determinando o equivalente em água do calorímetro usando ácido benzóico padrão como amostra no calorímetro. Nunca deve-se utilizar menos de 0,9g ou mais de 1,1g de ácido benzóico padrão. Cada determinação deve ser realizada de acordo com o mesmo procedimento realizado para a amostra, observando a temperatura corrigida “t”.

As correções para o ácido nítrico formado na combustão e para o fio de ignição devem ser determinadas como descrito na seguinte equação:

$$A = \frac{H.p + e_1 + e_3}{t}$$

onde:

A = equivalente em água do calorímetro em calorias por grau Celsius.

H = poder calorífico do ácido benzóico padrão (6318 cal/g).

p = peso da amostra de ácido benzóico padrão, em gramas.

t = elevação de temperatura corrigida

e1 = correção para o calor de formação de ácido nítrico, em calorias.

e3 = correção para o poder calorífico do fio de ignição, em calorias.

## Procedimento

O peso da amostra deve ser controlado de modo que a elevação da temperatura produzida na sua combustão seja igual àquela produzida pela combustão de 0,9 a 1,1g de ácido benzóico. Pese a amostra com aproximação de 0,1 mg. Se o poder calorífico da amostra é conhecido, o peso necessário pode ser estimado do seguinte modo:

$$P = \frac{6318}{h_1}$$

onde :

P = peso da amostra, em gramas

$h_1$  = poder calorífico aproximado da amostra, em calorias por grama.

Após a pesagem da amostra, deve-se adicionar 1 ml de água deionizada no interior do corpo da bomba antes de fechá-la para a colocação do oxigênio. Com a amostra a ensaiar e o fio de ignição no lugar, pressuriza-se a bomba com 30 atm de oxigênio, pressão manométrica, à temperatura ambiente. Após a pressurização coloca-se a bomba no banho e inicia-se a agitação. Deixe permanecer por 5 minutos para atingir o equilíbrio; registra-se então as temperaturas do calorímetro a cada minuto de intervalo durante 5 minutos. Queima-se a amostra no início do sexto minuto e registra-se o tempo e a temperatura t. Adicione a esta temperatura 60% da elevação esperada e registra-se o tempo no qual o ponto a 60% foi atingido. Após este rápido período de elevação de temperatura (cerca de 4 a 5 minutos) registra-se as temperaturas com intervalo de 1 minuto até que as diferenças entre as leituras sucessivas sejam constantes por 5 minutos.

Remova-se a bomba, despressuriza-se a velocidade uniforme de modo que a operação requeira tempo nunca inferior a 1 minuto. Examina-se o interior da bomba para verificar se houve combustão incompleta. Lava-se o interior da bomba, incluindo os eletrodos e o suporte da amostra, com um jato fino de água e recolha-se quantitativamente as águas de lavagem num béquer. Usa-se um mínimo de

água de lavagem, de preferência menos de 350 ml. Titule-se as águas de lavagem com solução de álcali padrão, usando vermelho ou alaranjado de metila como indicador.

## Cálculo

Utilizando-se os dados obtidos durante o procedimento, determina-se a elevação de temperatura  $t$ , num calorímetro isotérmico como segue:

$$t = t_c - t_a - r_1(b-a) - r_2(c-b)$$

onde:

$t$  = elevação de temperatura corrigida

$a$  = tempo de ignição (instante em que se dá a ignição)

$b$  = tempo em que a elevação de temperatura alcança 60% do total com aproximação de 0,1 minuto.

$c$  = tempo no início do período no qual a variação de temperatura com o tempo torna-se constante.

$t_a$  = temperatura no momento de ignição (no instante  $a$ )

$t_c$  = temperatura no tempo  $c$ .

$r_1$  = razão (unidade de temperatura por minuto) na qual a temperatura se elevou durante o período de 5 minutos antes da ignição.

$r_2$  = razão na qual a temperatura se elevou durante o período de 5 minutos após o tempo  $c$ . Se a temperatura está caindo,  $r_2$  é negativo e a quantidade  $-r_2(c-b)$  é positiva.

Após o cálculo da determinação da elevação de temperatura, determina-se o poder calorífico superior pela substituição na fórmula abaixo:

$$H_s = \frac{t \times A - e_1 - e_2 - e_3}{p}$$

onde:

$H_s$  = poder calorífico superior, em calorias por grama.

T = elevação de temperatura corrigida calculada

A = equivalente em água do calorímetro em calorias por grau Celsius.

$e_1$  = correção para o calor de formação do ácido nítrico em calorias = mililitros de solução de álcali padrão usado na titulação do ácido.

$e_2$  = correção para o calor de formação do ácido sulfúrico em calorias = 14 x porcentagem em enxofre na amostra x peso da amostra em gramas.

$e_3$  = correção para o poder calorífico do fio de ignição, em calorias = 2,7 x comprimento do fio de ferro consumido em cm ou 2,3 x comprimento do fio de cromel consumido em cm.

p = peso da amostra.

Se a percentagem de hidrogênio de uma amostra é conhecida, o poder calorífico inferior pode ser calculado como segue

$$Hi = H_s - (50,68 \times H)$$

onde:

$Hi$  = poder calorífico inferior

$H_s$  = poder calorífico superior

H = percentagem de hidrogênio

### **Padronização do calorímetro com ácido benzóico**

<b>Amostra</b>	<b>A (cal/<math>^{\circ}</math>C)</b>	<b>H (cal/g)</b>
1	3.702,75	6318
2	3.608,89	6318
3	3.920,83	6318
4	3.797,82	6318
5	3.655,69	6318
6	3.562,59	6318
<b>Média</b>	<b>3.750,10</b>	<b>6318</b>

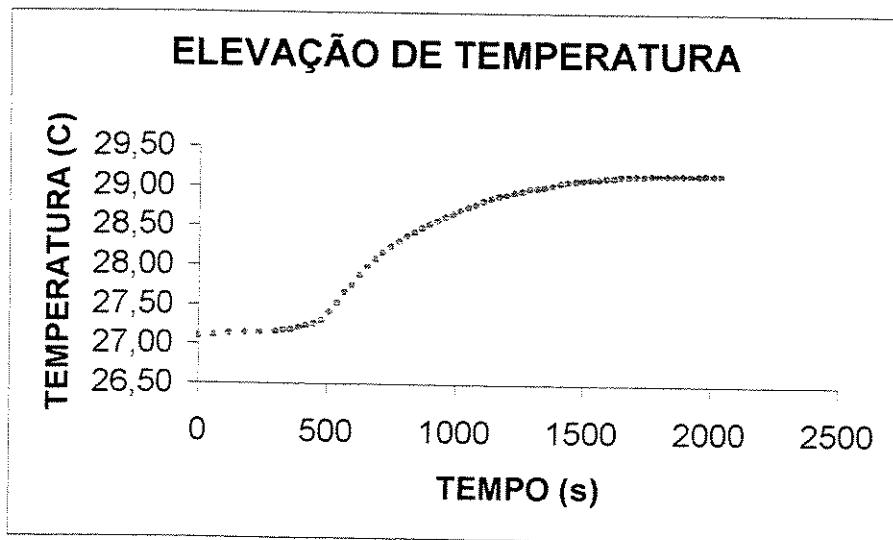
**Quadro 1B – Padronização do calorímetro com ácido benzóico padrão.**

	<b>PARÂMETROS</b>	<b>UNID.</b>	<b>VALOR</b>
	Massa de Ácido Benzóico	g	1,1295
	Massa Pastilha	g	1,1175
	Massa Fio de Algodão	g	0,0046
	Temperatura Ambiente	°C	22,00
	Temperatura da Camisa	°C	28,10
	Temperatura do calorímetro	°C	27,10
e <sub>1</sub>	Volume de Alcalí (ml)	ml	4,5
H	Poder Calorífico Ácido Benzóico (cal/g)	cal/g	6,318
e <sub>3</sub>	Correção para o fio de ignição		4,6
a	Tempo de ignição (min.)	min.	5
p	Massa de Ácido Benzóico (g)	g	1,1129
t	Elevação da Temperatura Corrigida	°C	1,9014
b	Tempo elevação de temperatura = 60% da temperatura total com aproximação +/- 0,1 min.	min.	13,22
c	Tempo para estabilização da temperatura final do experimento	min.	29,5
t <sub>a</sub>	Temperatura no momento da ignição	°C	27,16
r <sub>1</sub>	Variação de temperatura/tempo nos primeiros 5 min. de medida	°C	0,0120
r <sub>2</sub>	Variação de temperatura/tempo nos últimos 5 min. de medida	°C	0
t <sub>c</sub>	temperatura no tempo c	°C	29,16
A	<b>Equivalente em água do calorímetro (cal/°C)</b>	cal/°C	<b>3.702,75</b>

		<b>Índice</b>	<b>T (min.)</b>
60% da temperatura máxima (°C)	28,34		
Maior valor abaixo de 60%	28,31	23	780
Menor valor acima de 60%	28,37	24	810
Tempo para atingir 60% da temperatura máxima (min.)			13,22

### CURVA DO AUMENTO DA TEMPERATURA

TEMPO (S)	TEMPERATURA (°C)	TEMPO (S)	TEMPERATURA (°C)	TEMPO (S)	TEMPERATURA (°C)
60 s	**	750	28,24	1410	29,05
0	27,10	780	28,31	1440	29,07
60	27,12	810	28,37	1470	29,08
120	27,13	840	28,42	1500	29,09
180	27,14	870	28,48	1530	29,10
240	27,15	900	28,53	1560	29,11
300	27,16	930	28,57	1590	29,12
30 s	**	960	28,62	1620	29,13
330	27,17	990	28,66	1650	29,14
360	27,18	1020	28,70	1680	29,14
390	27,21	1050	28,74	1710	29,15
420	27,24	1080	28,77	1740	29,15
450	27,26	1110	28,82	1770	29,16
480	27,30	1140	28,85	1800	29,16
510	27,41	1170	28,88	1830	29,16
540	27,52	1200	28,90	1860	29,16
570	27,66	1230	28,93	1890	29,16
600	27,74	1260	28,95	1920	29,16
630	27,88	1290	28,98	1950	29,16
660	27,99	1320	28,99	1980	29,16
690	28,08	1350	29,00	2010	29,16
720	28,16	1380	29,02	2040	29,16



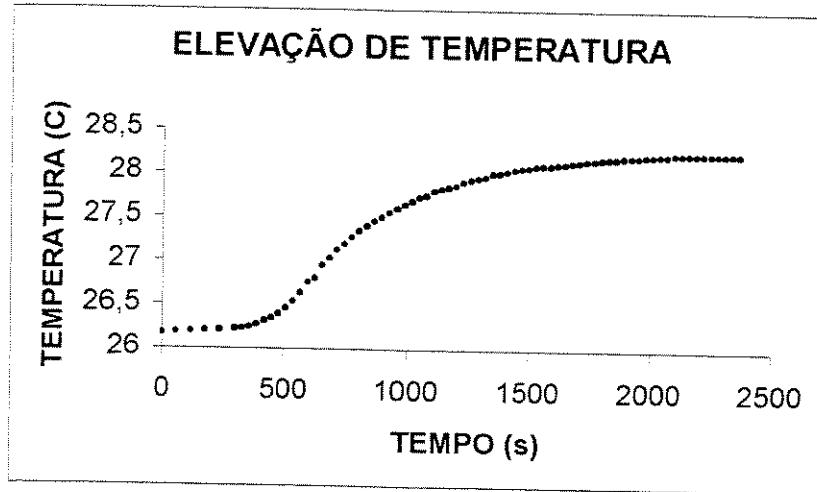
**Quadro 2B – Padronização do calorímetro com ácido benzóico padrão**

	PARÂMETROS	UNID.	VALOR
	Massa de Ácido Benzóico	g	1,1879
	Massa Pastilha	g	1,176
	Massa Fio de Algodão	g	0,004
	Temperatura Ambiente	°C	25,10
	Temperatura da Camisa	°C	26,50
	Temperatura do calorímetro	°C	26,17
e <sub>1</sub>	Volume de Alcalí (ml)	ml	1,3
H	Poder Calorífico Ácido Benzóico (cal/g)	cal/g	6.318
e <sub>3</sub>	Correção para o fio de ignição		4,6
a	Tempo de ignição (min.)	min.	5
p	Massa de Ácido Benzóico (g)	g	1,172
t	Elevação da Temperatura Corrigida	°C	1,9194
b	Tempo elevação de temperatura = 60% da temperatura total com aproximação +/- 0,1 min.	min.	14,06
c	Tempo para estabilização da temperatura final do experimento	min.	35
t <sub>a</sub>	Temperatura no momento da ignição	°C	26,22
r <sub>1</sub>	Variação de temperatura/tempo nos primeiros 5 min. de medida	°C	0,1000
r <sub>2</sub>	Variação de temperatura/tempo nos últimos 5 min. de medida	°C	0
t <sub>c</sub>	temperatura no tempo c	°C	28,23
A	<b>Equivalente em água do calorímetro (cal/°C)</b>	cal/°C	<b>3.860,89</b>

		Índice	T (min.)
60% da temperatura máxima (°C)	27,41		
Maior valor abaixo de 60%	27,40	25	840
Menor valor acima de 60%	27,45	26	870
Tempo para atingir 60% da temperatura máxima (min.)			14,06

### CURVA DO AUMENTO DA TEMPERATURA

TEMPO (S)	TEMPERATURA (°C)	TEMPO (S)	TEMPERATURA (°C)	TEMPO (S)	TEMPERATURA (°C)
60 s	**	870	27,45	1650	28,12
0	26,17	900	27,50	1680	28,13
60	26,18	930	27,55	1710	28,14
120	26,19	960	27,60	1740	28,15
180	26,20	990	27,64	1770	28,16
240	26,21	1020	27,68	1800	28,17
300	26,22	1050	27,73	1830	28,18
30 s	**	1080	27,75	1860	28,18
330	26,23	1110	27,80	1890	28,19
360	26,24	1140	27,82	1920	28,20
390	26,27	1170	27,84	1950	28,20
420	26,31	1200	27,86	1980	28,21
450	26,34	1230	27,90	2010	28,21
480	26,39	1260	27,93	2040	28,22
510	26,46	1290	27,95	2070	28,22
540	26,53	1320	27,96	2100	28,23
570	26,63	1350	28,00	2130	28,23
600	26,75	1380	28,01	2160	28,23
630	26,80	1410	28,03	2190	28,23
660	26,95	1440	28,05	2220	28,23
690	27,03	1470	28,06	2250	28,23
720	27,12	1500	28,07	2280	28,23
750	27,19	1530	28,09	2310	28,23
780	27,27	1560	28,10	2340	28,23
810	27,34	1590	28,10	2370	28,23
840	27,40	1620	28,11	2400	-



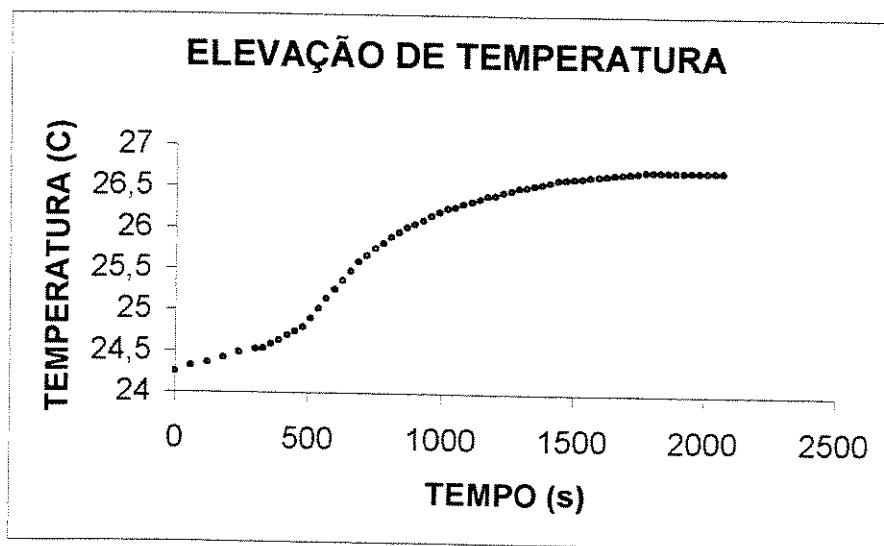
**Quadro 3B - Padronização do calorímetro com ácido benzóico padrão**

PARÂMETROS		UNID.	VALOR
Massa de Ácido Benzóico		g	1,1259
Massa Pastilha		g	1,1178
Massa Fio de Algodão		g	0,0047
Temperatura Ambiente		°C	22
Temperatura da Camisa		°C	27,51
Temperatura do calorímetro		°C	24,25
e <sub>1</sub>	Volume de Alcalí (ml)	ml	1,5
H	Poder Calorífico Ácido Benzóico (cal/g)	cal/g	6.318
e <sub>3</sub>	Correção para o fio de ignição		4,6
a	Tempo de ignição (min.)	min.	5
p	Massa de Ácido Benzóico (g)	g	1,1131
t	Elevação da Temperatura Corrigida	°C	1,7952
b	Tempo elevação de temperatura = 60% da temperatura total com aproximação +/- 0,1 min.	min.	12,31
c	Tempo para estabilização da temperatura final do experimento	min.	30
t <sub>a</sub>	Temperatura no momento da ignição	°C	24,52
r <sub>1</sub>	Variação de temperatura/tempo nos primeiros 5 min. de medida	°C	0,05400
r <sub>2</sub>	Variação de temperatura/tempo nos últimos 5 min. de medida	°C	0
t <sub>c</sub>	temperatura no tempo c	°C	26,71
A	<b>Equivalente em água do calorímetro (cal/°C)</b>	cal/°C	<b>3.920,83</b>

		Índice	T (min.)
60% da temperatura máxima (°C)	25,73		
Maior valor abaixo de 60%	25,67	21	720
Menor valor acima de 60%	25,76	22	750
Tempo para atingir 60% da temperatura máxima (min.)			12,31

### CURVA DO AUMENTO DA TEMPERATURA

TEMPO (S)	TEMPERATURA (°C)	TEMPO (S)	TEMPERATURA (°C)	TEMPO (S)	TEMPERATURA (°C)
60 s	**	780	25,82	1470	26,61
0	24,25	810	25,90	1500	26,62
60	24,32	840	25,95	1530	26,63
120	24,36	870	26,01	1560	26,64
180	24,42	900	26,05	1590	26,65
240	24,48	930	26,10	1620	26,66
300	24,52	960	26,15	1650	26,67
30 s	**	990	26,20	1680	26,68
330	24,53	1020	26,25	1710	26,69
360	24,58	1050	26,26	1740	26,70
390	24,63	1080	26,30	1770	26,71
420	24,69	1110	26,33	1800	26,71
450	24,74	1140	26,36	1830	26,71
480	24,79	1170	26,40	1860	26,71
510	24,90	1200	26,41	1890	26,71
540	25,02	1230	26,45	1920	26,71
570	25,14	1260	26,47	1950	26,71
600	25,25	1290	26,50	1980	26,71
630	25,36	1320	26,51	2010	26,71
660	25,48	1350	26,53	2040	26,71
690	25,59	1380	26,55	2070	26,71
720	25,67	1410	26,57	2100	-
750	25,76	1440	26,60	2130	-



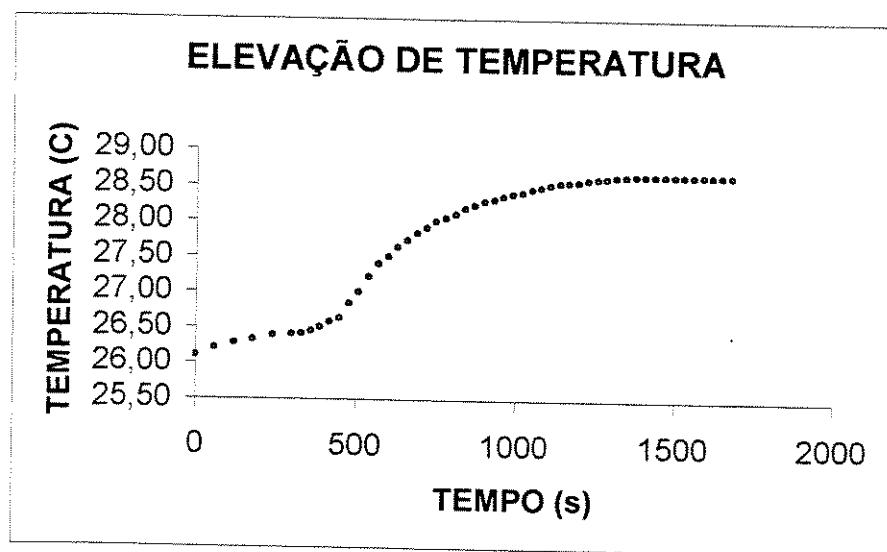
**Quadro 4B - Padronização do calorímetro com ácido benzóico padrão**

	PARÂMETROS	UNID.	VALOR
	Massa de Ácido Benzóico	g	1,1471
	Massa Pastilha	g	1,145
	Massa Fio de Algodão	g	0,0049
	Temperatura Ambiente	°C	26
	Temperatura da Camisa	°C	27,8
	Temperatura do calorímetro	°C	26,10
e <sub>1</sub>	Volume de Alcalí (ml)	ml	4,3
H	Poder Calorífico Ácido Benzóico (cal/g)	cal/g	6,318
e <sub>3</sub>	Correção para o fio de ignição		4,6
a	Tempo de ignição (min.)	min.	5
p	Massa de Ácido Benzóico (g)	g	1,1401
t	Elevação da Temperatura Corrigida	°C	1,899
b	Tempo elevação de temperatura = 60% da temperatura total com aproximação +/- 0,1 min.	min.	10,50
c	Tempo para estabilização da temperatura final do experimento	min.	23,50
t <sub>a</sub>	Temperatura no momento da ignição	°C	26,41
r <sub>1</sub>	Variação de temperatura/tempo nos primeiros 5 min. de medida	°C	0,06200
r <sub>2</sub>	Variação de temperatura/tempo nos últimos 5 min. de medida	°C	0
t <sub>c</sub>	temperatura no tempo c	°C	28,65
A	<b>Equivalente em água do calorímetro (cal/°C)</b>	cal/°C	<b>3.797,82</b>

		Índice	T (min.)
60% da temperatura máxima (°C)	27,63		
Maior valor abaixo de 60%	27,63	18	630
Menor valor acima de 60%	27,73	19	660
Tempo para atingir 60% da temperatura máxima (min.)			10,50

### CURVA DO AUMENTO DA TEMPERATURA

TEMPO (S)	TEMPERATURA (°C)	TEMPO (S)	TEMPERATURA (°C)	TEMPO (S)	TEMPERATURA (°C)
60 s	**	630	27,63	1170	28,55
0	26,10	660	27,73	1200	28,56
60	26,21	690	27,83	1230	28,59
120	26,28	720	27,91	1260	28,60
180	26,33	750	28,00	1290	28,61
240	26,39	780	28,05	1320	28,63
300	26,41	810	28,10	1350	28,64
30 s	**	840	28,18	1380	28,65
330	26,42	870	28,23	1410	28,65
360	26,45	900	28,28	1440	28,65
390	26,51	930	28,31	1470	28,65
420	26,58	960	28,35	1500	28,65
450	26,63	990	28,39	1530	28,65
480	26,84	1020	28,41	1560	28,65
510	27,00	1050	28,45	1590	28,65
540	27,22	1080	28,48	1620	28,65
570	27,40	1110	28,51	1650	28,65
600	27,50	1140	28,54	1680	28,65



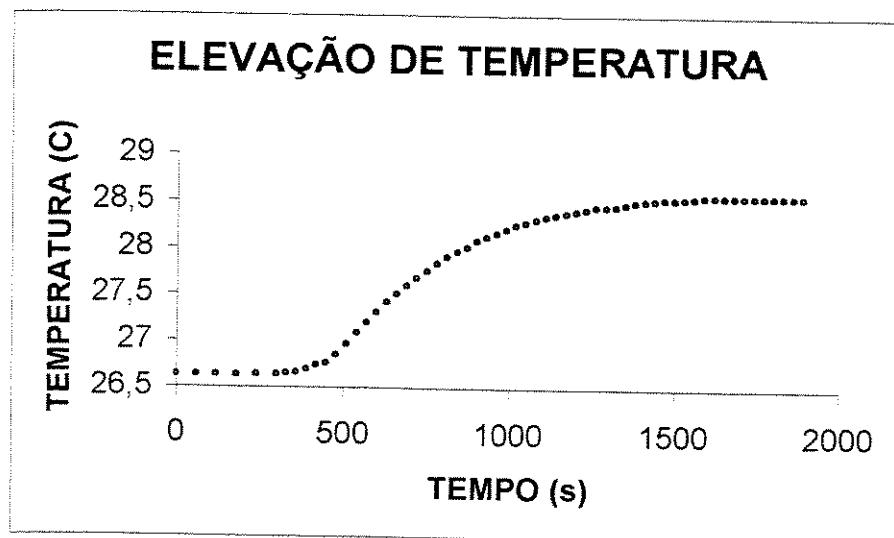
**Quadro 5B - Padronização do calorímetro com ácido benzóico padrão**

	PARÂMETROS	UNID.	VALOR
	Massa de Ácido Benzóico	g	1,1126
	Massa Pastilha	g	1,1055
	Massa Fio de Algodão	g	0,0045
	Temperatura Ambiente	°C	22,5
	Temperatura da Camisa	°C	27,5
	Temperatura do calorímetro	°C	26,63
e <sub>1</sub>	Volume de Alcalí (ml)	ml	2,1
H	Poder Calorífico Ácido Benzóico (cal/g)	cal/g	6.318
e <sub>3</sub>	Correção para o fio de ignição		4,6
a	Tempo de ignição (min.)	min.	5
p	Massa de Ácido Benzóico (g)	g	1,101
t	Elevação da Temperatura Corrigida	°C	1,90465
b	Tempo elevação de temperatura = 60% da temperatura total com aproximação +/- 0,1 min.	min.	12,68
c	Tempo para estabilização da temperatura final do experimento	min.	27
t <sub>a</sub>	Temperatura no momento da ignição	°C	26,64
r <sub>1</sub>	Variação de temperatura/tempo nos primeiros 5 min. de medida	°C	0,00200
r <sub>2</sub>	Variação de temperatura/tempo nos últimos 5 min. de medida	°C	0
t <sub>c</sub>	temperatura no tempo c	°C	28,56
A	Equivalente em água do calorímetro (cal/°C)	cal/°C	3.655,69

		Índice	T (min.)
60% da temperatura máxima (°C)	27,79		
Maior valor abaixo de 60%	27,76	22	750
Menor valor acima de 60%	27,84	23	780
Tempo para atingir 60% da temperatura máxima (min.)			12,68

### CURVA DO AUMENTO DA TEMPERATURA

TEMPO (S)	TEMPERATURA (°C)	TEMPO (S)	TEMPERATURA (°C)	TEMPO (S)	TEMPERATURA (°C)
60 s	**	720	27,68	1350	26,48
0	26,63	750	27,76	1380	28,50
60	26,63	780	27,84	1410	28,51
120	26,63	810	27,91	1440	28,52
180	26,63	840	27,96	1470	28,53
240	26,64	870	28,01	1500	28,53
300	26,64	900	28,08	1530	28,54
30 s	**	930	28,12	1560	28,55
330	26,65	960	28,16	1590	28,56
360	26,66	990	28,20	1620	28,56
390	26,69	1020	28,25	1650	28,56
420	26,74	1050	28,28	1680	28,56
450	26,76	1080	28,31	1710	28,56
480	26,85	1110	28,34	1740	28,56
510	26,97	1140	28,36	1770	28,56
540	27,09	1170	28,38	1800	28,56
570	27,20	1200	28,40	1830	28,56
600	27,31	1230	28,42	1860	28,56
630	27,42	1260	28,45	1890	28,56
660	27,51	1290	28,45	1920	-
690	27,60	1320	28,46	1950	-



**Quadro 6B - Padronização do calorímetro com ácido benzóico padrão**

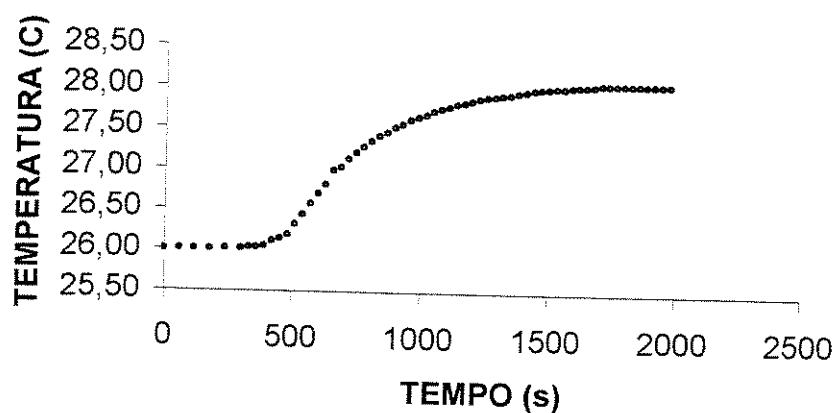
	<b>PARÂMETROS</b>	<b>UNID.</b>	<b>VALOR</b>
	Massa de Ácido Benzóico	g	1,1755
	Massa Pastilha	g	1,1306
	Massa Fio de Algodão	g	0,0043
	Temperatura Ambiente	°C	22
	Temperatura da Camisa	°C	27,10
	Temperatura do calorímetro	°C	26
e <sub>1</sub>	Volume de Alcalí (ml)	ml	1,57
H	Poder Calorífico Ácido Benzóico (cal/g)	cal/g	6,318
e <sub>3</sub>	Correção para o fio de ignição		4,6
a	Tempo de ignição (min.)	min.	5
p	Massa de Ácido Benzóico (g)	g	1,1263
t	Elevação da Temperatura Corrigida	°C	1,999143
b	Tempo elevação de temperatura = 60% da temperatura total com aproximação +/- 0,1 min.	min.	12,71
c	Tempo para estabilização da temperatura final do experimento	min.	28,50
t <sub>a</sub>	Temperatura no momento da ignição	°C	26,02
r <sub>1</sub>	Variação de temperatura/tempo nos primeiros 5 min. de medida	°C	0,00400
r <sub>2</sub>	Variação de temperatura/tempo nos últimos 5 min. de medida	°C	0
t <sub>c</sub>	temperatura no tempo c	°C	28,05
A	<b>Equivalente em água do calorímetro (cal/°C)</b>	cal/°C	<b>3.562,59</b>

		<b>Índice</b>	<b>T (min.)</b>
60% da temperatura máxima (°C)	27,23		
Maior valor abaixo de 60%	27,20	22	750
Menor valor acima de 60%	27,27	23	780
Tempo para atingir 60% da temperatura máxima (min.)			12,71

### CURVA DO AUMENTO DA TEMPERATURA

TEMPO (S)	TEMPERATURA (°C)	TEMPO (S)	TEMPERATURA (°C)	TEMPO (S)	TEMPERATURA (°C)
60 s	**	750	27,20	1410	27,96
0	26,00	780	27,27	1440	27,98
60	26,01	810	27,34	1470	27,99
120	26,01	840	27,40	1500	28,00
180	26,01	870	27,45	1530	28,01
240	26,02	900	27,51	1560	28,01
300	26,02	930	27,55	1590	28,02
30 s	**	960	27,61	1620	28,03
330	26,03	990	27,64	1650	28,03
360	26,03	1020	27,67	1680	28,04
390	26,05	1050	27,72	1710	28,05
420	26,11	1080	27,75	1740	28,05
450	26,14	1110	27,77	1770	28,05
480	26,19	1140	27,80	1800	28,05
510	26,32	1170	27,82	1830	28,05
540	26,44	1200	27,84	1860	28,05
570	26,57	1230	27,87	1890	28,05
600	26,70	1260	27,89	1920	28,05
630	26,81	1290	27,90	1950	28,05
660	26,98	1320	27,91	1980	28,05
690	27,02	1350	27,92	2010	-
720	27,12	1380	27,94	2040	-

**ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA**



Determinação do poder calorífico (Hs) da fração leve de placas de circuito impresso

<b>Amostra</b>	<b>Hs (MJ/kg)</b>
1	12,04
2	11,45
3	10,95
4	11,26
5	11,78
6	12,30
<b>Média</b>	<b>11,63</b>

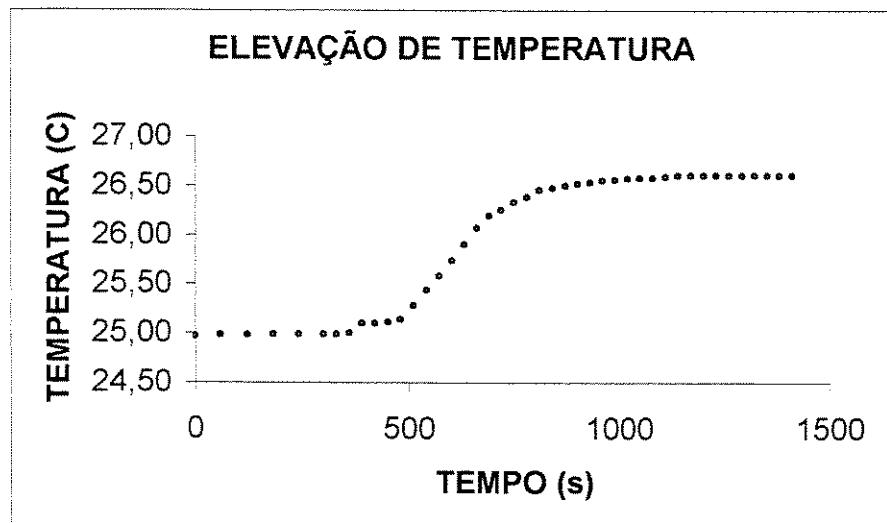
**Quadro 7B - Poder calorífico da fração leve de placas de circuito impresso**

	<b>PARÂMETROS</b>	<b>UNID.</b>	<b>VALOR</b>
	Massa de Ácido Benzóico	g	2,0195
	Massa Pastilha	g	2,0175
	Massa Fio de Algodão	g	0,0044
	Temperatura Ambiente	°C	24,10
	Temperatura da Camisa	°C	23,10
	Temperatura do calorímetro	°C	24,97
e <sub>1</sub>	Volume de Alcalí (ml)	ml	4,4
H	Poder Calorífico Ácido Benzóico (cal/g)	cal/g	6.318
e <sub>3</sub>	Correção para o fio de ignição		4,6
a	Tempo de ignição (min.)	min.	5
A	Equivalente em água do calorímetro (cal/°C)	cal/°C	3.657,52
p	Massa de Ácido Benzóico (g)	g	2,0131
t	Elevação da Temperatura Corrigida	°C	1,587435
b	Tempo elevação de temperatura = 60% da temperatura total com aproximação +/- 0,1 min.	min.	10,64
c	Tempo para estabilização da temperatura final do experimento	min.	19
t <sub>a</sub>	Temperatura no momento da ignição	°C	24,99
r <sub>1</sub>	Variação de temperatura/tempo nos primeiros 5 min. de medida	°C	0,00400
r <sub>2</sub>	Variação de temperatura/tempo nos últimos 5 min. de medida	°C	0
c	temperatura no tempo c	°C	26,6
H <sub>s</sub>	<b>Poder calorífico Superior</b>	cal/g	<b>2.880</b>
H <sub>s</sub>	<b>Poder calorífico Superior</b>	MJ/kg	<b>12,04</b>

		<b>Índice</b>	<b>T (min.)</b>
50% da temperatura máxima (°C)	25,95		
Maior valor abaixo de 60%	25,90	18	630
Menor valor acima de 60%	26,07	19	660
Tempo para atingir 60% da temperatura máxima (min.)			10,64

### CURVA DO AUMENTO DA TEMPERATURA

TEMPO (S)	TEMPERATURA (°C)	TEMPO (S)	TEMPERATURA (°C)	TEMPO (S)	TEMPERATURA (°C)
60 s	**	510	25,28	930	26,53
0	24,97	540	25,44	960	26,55
60	24,98	570	25,58	990	26,56
120	24,98	600	25,74	1020	26,57
180	24,99	630	25,90	1050	26,58
240	24,99	660	26,07	1170	26,58
300	24,99	690	26,19	1200	26,59
30 s	**	720	26,25	1230	26,60
330	24,99	750	26,33	1260	26,60
360	25,00	780	26,38	1290	26,60
390	25,10	810	26,45	1320	26,60
420	25,10	840	26,47	1350	26,60
450	25,11	870	26,50	1380	26,60
480	25,14	900	26,52	1410	26,60



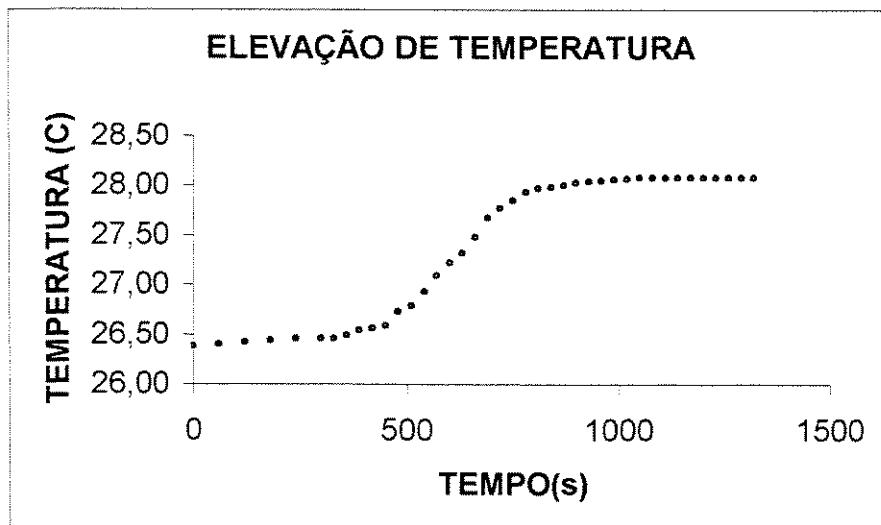
**Quadro 8B - Poder calorífico da fração leve de placas de circuito impresso**

	<b>PARÂMETROS</b>	<b>UNID.</b>	<b>VALOR</b>
Massa de Ácido Benzóico		g	2,0257
Massa Pastilha		g	2,0415
Massa Fio de Algodão		g	0,0046
Temperatura Ambiente		°C	24,10
Temperatura da Camisa		°C	23,50
Temperatura do calorímetro		°C	26,38
Volume de Alcalí (ml)		ml	4,6
Poder Calorífico Ácido Benzóico (cal/g)		cal/g	6.318
Correção para o fio de ignição			4,6
Tempo de ignição (min.)		min.	5
Equivalente em água do calorímetro (cal/°C)		cal/°C	3.657,52
Massa de Ácido Benzóico (g)		g	2,0369
Elevação da Temperatura Corrigida		°C	1,528
Tempo elevação de temperatura = 60% da temperatura total com aproximação +/- 0,1 min.		min.	10,75
Tempo para estabilização da temperatura final do experimento		min.	17,5
Temperatura no momento da ignição		°C	26,46
Variação de temperatura/tempo nos primeiros 5 min. de medida		°C	0,01600
Variação de temperatura/tempo nos últimos 5 min. de medida		°C	0
Temperatura no tempo c		°C	28,08
<b>Is Poder calorífico Superior</b>		cal/g	<b>2.739</b>
<b>Is Poder Calorífico Superior</b>		MJ/kg	<b>11,45</b>

		<b>Índice</b>	<b>T (min.)</b>
0% da temperatura máxima (°C)	27,40		
Maior valor abaixo de 60%	27,32	18	630
Menor valor acima de 60%	27,48	19	660
Tempo para atingir 60% da temperatura máxima (min.)			10,75

### CURVA DO AUMENTO DA TEMPERATURA

TEMPO (S)	TEMPERATURA (°C)	TEMPO (S)	TEMPERATURA (°C)	TEMPO (S)	TEMPERATURA (°C)
60 s	**	510	26,79	930	28,04
0	26,38	540	26,93	960	28,05
60	26,40	570	27,09	990	28,06
120	26,42	600	27,22	1020	28,07
180	26,44	630	27,32	1050	28,08
240	26,46	660	27,48	1080	28,08
300	26,46	690	27,67	1110	28,08
30 s	**	720	27,77	1140	28,08
330	26,46	750	27,85	1170	28,08
360	26,49	780	27,93	1200	28,08
390	26,54	810	27,97	1230	28,08
420	26,56	840	27,98	1260	28,08
450	26,59	870	28,00	1290	28,08
480	26,73	900	28,03	1320	28,08



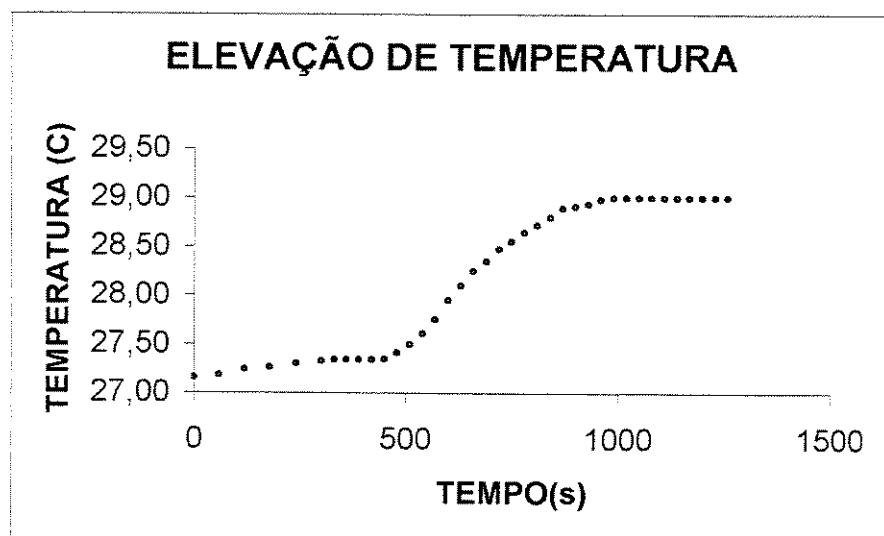
**Quadro 9B - Poder calorífico da fração leve de placas de circuito impresso**

PARÂMETROS		UNID.	VALOR
Massa de Ácido Benzoíco		g	2,0259
Massa Pastilha		g	2,0431
Massa Fio de Algodão		g	0,0041
Temperatura Ambiente		°C	25,20
Temperatura da Camisa		°C	24,00
Temperatura do calorímetro		°C	27,16
Volume de Alcalí (ml)		ml	6,30
Poder Calorífico Ácido Benzoíco (cal/g)		cal/g	6.318
Correção para o fio de ignição			4,6
Tempo de ignição (min.)		min.	5
Equivalente em água do calorímetro (cal/°C)		cal/°C	3.657,52
Massa de Ácido Benzoíco (g)		g	2,039
Elevação da Temperatura Corrigida		°C	1,46362
Tempo elevação de temperatura = 60% da temperatura total com aproximação +/- 0,1 min.		min.	11,07
Tempo para estabilização da temperatura final do experimento		min.	16,50
Temperatura no momento da ignição		°C	27,33
Variação de temperatura/tempo nos primeiros 5 min. de medida		°C	0,03400
Variação de temperatura/tempo nos últimos 5 min. de medida		°C	0
temperatura no tempo c		°C	29
<b>Is Poder calorífico Superior</b>		cal/g	<b>2.620</b>
<b>Is Poder calorífico Inferior</b>		MJ/kg	<b>10,95</b>

		Índice	T (min.)
0% da temperatura máxima (°C)	28,264		
Aior valor abaixo de 60%	28,25	19	660
Aenor valor acima de 60%	28,35	20	690
empo para atingir 60% da temperatura máxima (min.)			11,07

### CURVA DO AUMENTO DA TEMPERATURA

TEMPO (S)	TEMPERATURA (°C)	TEMPO (S)	TEMPERATURA (°C)	TEMPO (S)	TEMPERATURA (°C)
60 s	**	510	27,75	930	29,00
0	27,16	540	27,95	960	29,00
60	27,18	570	28,10	990	29,00
120	27,24	600	28,25	1020	29,00
180	27,26	630	28,35	1050	29,00
240	27,30	660	28,47	1080	29,00
300	27,33	690	28,55	1110	29,00
30 s	**	720	28,64	1140	29,00
330	27,34	750	28,72	1170	29,00
360	27,34	780	28,80	1200	29,00
390	27,34	810	28,89	1230	29,00
420	27,34	840	28,91	1260	29,00
450	27,35	870	28,94	1290	-
480	27,41	900	28,98	1320	-



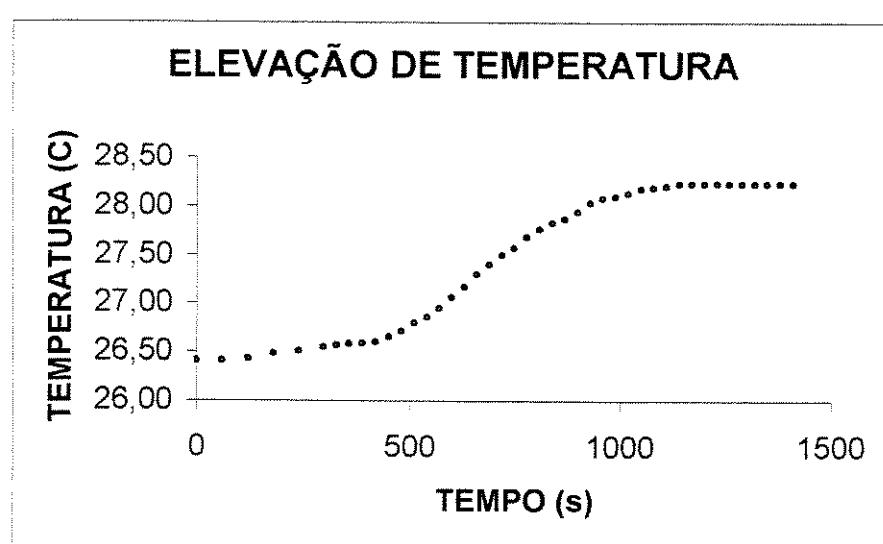
**Quadro 10B - Poder calorífico do lamina da fração leve de placas de circuito impresso**

<b>PARÂMETROS</b>		<b>UNID.</b>	<b>VALOR</b>
Massa de Ácido Benzóico		g	2,0133
Massa Pastilha		g	2,0148
Massa Fio de Algodão		g	0,0044
Temperatura Ambiente		°C	24,60
Temperatura da Camisa		°C	24,40
Temperatura do calorímetro		°C	26,41
Volume de Alcalí (ml)		ml	7,90
Poder Calorífico Ácido Benzóico (cal/g)		cal/g	6.318
Correção para o fio de ignição			4,6
Tempo de ignição (min.)		min.	5
Equivalente em água do calorímetro (cal/°C)		cal/°C	3.657,52
Massa de Ácido Benzóico (g)		g	2,0104
Elevação da Temperatura Corrigida		°C	1,4836
Tempo elevação de temperatura = 60% da temperatura total com aproximação +/- 0,1 min.		min.	12,01
Tempo para estabilização da temperatura final do experimento		min.	19
Temperatura no momento da ignição		°C	26,55
Variação de temperatura/tempo nos primeiros 5 min. de medida		°C	0,02800
Variação de temperatura/tempo nos últimos 5 min. de medida		°C	0
temperatura no tempo c		°C	28,23
<b>Is Poder calorífico Superior</b>		cal/g	<b>2.693</b>
<b>Is Poder calorífico Superior</b>		MJ/kg	<b>11,26</b>

		<b>Índice</b>	<b>T (min.)</b>
50% da temperatura máxima (°C)	27,502		
Maior valor abaixo de 60%	27,5	21	720
Menor valor acima de 60%	27,57	22	750
Tempo para atingir 60% da temperatura máxima (min.)			12,01

### CURVA DO AUMENTO DA TEMPERATURA

TEMPO (S)	TEMPERATURA (°C)	TEMPO (S)	TEMPERATURA (°C)	TEMPO (S)	TEMPERATURA (°C)
60 s	**	540	26,86	990	28,10
0	26,41	570	26,95	1020	28,13
60	26,41	600	27,06	1050	28,18
120	26,43	630	27,17	1080	28,19
180	26,48	660	27,30	1110	28,20
240	26,51	690	27,40	1140	28,23
300	26,55	720	27,50	1170	28,23
30 s	**	750	27,57	1200	28,23
330	26,57	780	27,68	1230	28,23
360	26,58	810	27,76	1260	28,23
390	26,59	840	27,83	1290	28,23
420	26,60	870	27,87	1320	28,23
450	26,65	900	27,94	1350	28,23
480	26,71	930	28,03	1380	28,23
510	26,80	960	28,08	1410	28,23



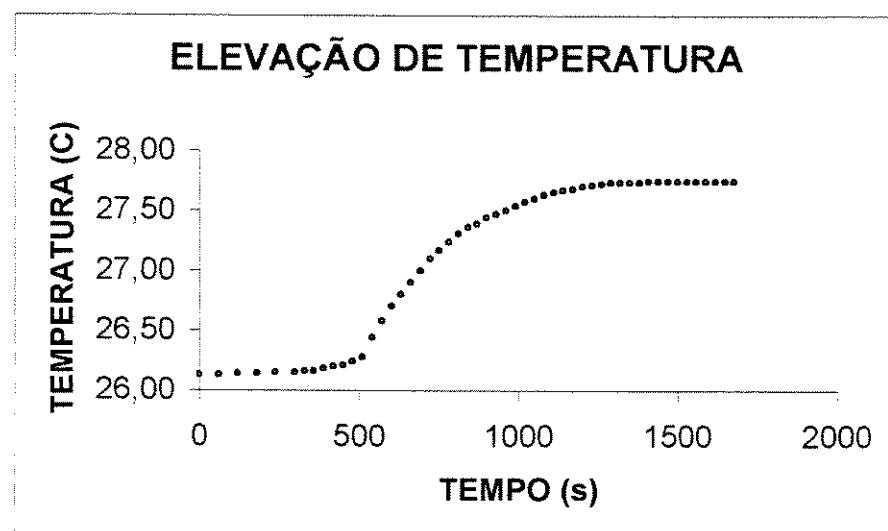
**Quadro 11B – Poder calorífico da fração leve de placas de circuito impresso**

<b>PARÂMETROS</b>		<b>UNID.</b>	<b>VALOR</b>
Massa de Ácido Benzóico		g	2,015
Massa Pastilha		g	2,0261
Massa Fio de Algodão		g	0,0042
Temperatura Ambiente		°C	22,80
Temperatura da Camisa		°C	24,80
Temperatura do calorímetro		°C	26,13
Volume de Alcalí (ml)		ml	7,30
Poder Calorífico Ácido Benzóico (cal/g)		cal/g	6.318
Correção para o fio de ignição			4,6
Tempo de ignição (min.)		min.	5
Equivalente em água do calorímetro (cal/°C)		cal/°C	3.657,52
Massa de Ácido Benzóico (g)		g	2,022
Elevação da Temperatura Corrigida		°C	1,56208
Tempo elevação de temperatura = 60% da temperatura total com aproximação +/- 0,1 min.		Min.	11,98
Tempo para estabilização da temperatura final do experimento		min.	23,5
Temperatura no momento da ignição		°C	26,15
Variação de temperatura/tempo nos primeiros 5 min. De medida		°C	0,00400
Variação de temperatura/tempo nos últimos 5 min. De medida		°C	0
temperatura no tempo c		°C	27,74
<b>Is Poder calorífico Superior</b>		cal/g	<b>2.820</b>
<b>Is Poder calorífico Superior</b>		MJ/kg	<b>11,78</b>

		<b>Índice</b>	<b>T (min.)</b>
0% da temperatura máxima (°C)	27,10		
Maior valor abaixo de 60%	27	20	690
Menor valor acima de 60%	27,10	21	720
Tempo para atingir 60% da temperatura máxima (min.)			11,98

### CURVA DO AUMENTO DA TEMPERATURA

TEMPO (S)	TEMPERATURA (°C)	TEMPO (S)	TEMPERATURA (°C)	TEMPO (S)	TEMPERATURA (°C)
60 s	**	630	26,80	1170	27,68
0	26,13	660	26,90	1200	27,70
60	26,13	690	27,00	1230	27,71
120	26,14	720	27,10	1260	27,72
180	26,14	750	27,17	1290	27,73
240	26,15	780	27,24	1320	27,73
300	26,15	810	27,31	1350	27,73
30 s	**	840	27,36	1380	27,73
330	26,16	870	27,39	1410	27,74
360	26,16	900	27,44	1440	27,74
390	26,18	930	27,47	1470	27,74
420	26,20	960	27,50	1500	27,74
450	26,21	990	27,54	1530	27,74
480	26,24	1020	27,57	1560	27,74
510	26,28	1050	27,60	1590	27,74
540	26,44	1080	27,63	1620	27,74
570	26,58	1110	27,65	1650	27,74
600	26,70	1140	27,67	1680	27,74



**Quadro 12B – Poder calorífico da fração leve de placas de circuito impresso**

<b>PARÂMETROS</b>		<b>UNID.</b>	<b>VALOR</b>
Massa de Ácido Benzóico		g	2,0568
Massa Pastilha		g	2,0675
Massa Fio de Algodão		g	0,004
Temperatura Ambiente		°C	26,60
Temperatura da Camisa		°C	28,10
Temperatura do calorímetro		°C	25,62
Volume de Alcalí (ml)		ml	17,40
Poder Calorífico Ácido Benzóico (cal/g)		cal/g	6.318
Correção para o fio de ignição			4,6
Tempo de ignição (min.)		min.	5
Equivalente em água do calorímetro (cal/°C)		cal/°C	3.657,52
Massa de Ácido Benzóico (g)		g	2,0635
Elevação da Temperatura Corrigida		°C	1,6656
Tempo elevação de temperatura = 60% da temperatura total com aproximação +/- 0,1 min.		Min.	8,40
Tempo para estabilização da temperatura final do experimento		min.	21
Temperatura no momento da ignição		°C	25,95
Variação de temperatura/tempo nos primeiros 5 min. De medida		°C	0,06600
Variação de temperatura/tempo nos últimos 5 min. De medida		°C	0
temperatura no tempo c		°C	27,84
<b>Is Poder calorífico Superior</b>		cal/g	<b>2.942</b>
<b>Is Poder calorífico Inferior</b>		MJ/kg	<b>12,30</b>

		<b>Índice</b>	<b>T (min.)</b>
0% da temperatura máxima (°C)	26,952		
Aior valor abaixo de 60%	26,76	13	480
Aenor valor acima de 60%	27	14	510
empo para atingir 60% da temperatura máxima (min.)			8,40

### CURVA DO AUMENTO DA TEMPERATURA

TEMPO (S)	TEMPERATURA (°C)	TEMPO (S)	TEMPERATURA (°C)	TEMPO (S)	TEMPERATURA (°C)
60 s	**	600	27,42	1110	27,83
0	25,62	630	27,53	1140	27,83
60	25,82	660	27,63	1170	27,83
120	25,92	690	27,68	1200	27,84
180	25,93	720	27,75	1230	27,84
240	25,95	750	27,78	1260	27,84
300	25,95	780	27,78	1290	27,84
30 s	**	810	27,79	1320	27,84
330	26,07	840	27,80	1350	27,84
360	26,21	870	27,80	1380	27,84
390	26,34	900	27,80	1410	27,84
420	26,49	930	27,81	1440	27,84
450	26,63	960	27,81	1470	27,84
480	26,76	990	27,81	1500	27,84
510	27,00	1020	27,82	1530	27,84
540	27,10	1050	27,82	1560	-
570	27,30	1080	27,82	1590	-

