

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

GUMERCINDO LÚCIO NAIA

**DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO
SUSTENTÁVEL: APROVEITAMENTO DE PLACAS
DE CIRCUITO IMPRESSO DESCARTADAS COMO
AGREGADO NA FABRICAÇÃO DE BLOCOS DE
ALVENARIA PARA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre Profissional em Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: **Desenvolvimento, Processamento e Caracterização de Materiais**

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Pereira Mello

Abril de 2014

Itajubá/MG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

GUMERCINDO LÚCIO NAIA

**DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO SUSTENTÁVEL:
APROVEITAMENTO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO
DESCARTADAS COMO AGREGADO NA FABRICAÇÃO DE BLOCOS
DE ALVENARIA PARA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Dissertação avaliada por banca examinadora em 8 de Abril de 2014, conferindo ao autor o título de **Mestre Profissional em Engenharia de Materiais**.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Angelo Caporalli Filho (UNESP)

Profa. Dra. Valquíria Claret dos Santos (UNIFEI)

Prof. Dr. Carlos Henrique Pereira Mello (UNIFEI) - Orientador

Abril de 2014

Itajubá/MG

ATENÇÃO

ESTA PÁGINA SERÁ SUBSTITUÍDA PELA FOLHA DE JULGAMENTO DA
BANCA EXAMINADORA

ATENÇÃO

ESTA PÁGINA SERÁ SUBSTITUÍDA PELO

TERMO DE ACEITE DE DISSERTAÇÃO

Dedicatória

Aos meus filhos, Helena, Miguel e Fábio,

que passaram por tantas dificuldades.

Vocês são lutadores e vencedores.

Minha admiração e meu amor sem limites.

Agradecimentos

Ao Bom Deus, sempre e por tudo.

Ao Prof. Dr. Carlos Henrique Pereira Mello, orientador deste trabalho, por todo o apoio que me prestou, pelas muitas observações e redirecionamentos no curso da dissertação, e pela paciência oriental ao lidar com as incontáveis prorrogações de prazo ocorridas em função de meus compromissos profissionais.

À Prof. Dra. Valquíria Claret dos Santos, pela criteriosa revisão dos textos e apoio na indicação e estruturação dos trabalhos de Iniciação Científica dos alunos Marina e Marcos Vinicius.

À Prof. Dra. Márcia Matiko Kondo, pelas valiosas observações, não apenas nos aspectos técnicos, mas também de posicionamento diante de situações inesperadas.

Ao Sr. Moisés Fernandes Jr.- Diretor da empresa SanLien Gestão de Resíduos - São Paulo, pelo trabalho de trituração das placas e o apoio à pesquisa.

Ao Sr. Plínio W. Roberto – Diretor da empresa G.V. Moinhos Ltda – São Paulo, pelo grande apoio no processo de moagem das placas de circuito impresso, envolvendo todo o trabalho de ajustes do moinho de desenvolvimento, na busca dos melhores resultados.

À empresa Crabi Artefatos de Cimento, nas pessoas dos Srs. Luis Carlos Crabi – Diretor Industrial, Cesar Costa – Gerente Comercial e Emerson José Silvério, técnico responsável pelo laboratório, por todo o trabalho de confecção dos blocos, ensaios de laboratório, análises dos resultados e pela disposição para colaborar em todos os momentos.

Aos alunos de graduação em Engenharia Civil da UNIFEI e bolsistas de Iniciação Científica, Marina Bayeux Delvecchio e Marcos Vinicius Moraes, pelos ensaios de laboratório e emissão de laudos para a caracterização dos resíduos moídos das placas de circuito impresso.

Aos Srs. Fabiano e Oswaldo, dos Laboratórios de Estruturas e Solos do Departamento de Engenharia Civil da UNIFEI, pelas muitas atenções durante os trabalhos de laboratório.

Resumo

Representando a parcela do lixo sólido urbano que mais cresce mundialmente, o lixo eletrônico é motivo de preocupações e de estudos por conter substâncias consideradas perigosas ao ser humano ou ao meio ambiente, e também por liberar substâncias tóxicas quando submetido a processos inadequados de recuperação de metais, dentre eles o ouro e o cobre, que apresentam as maiores vantagens econômicas. O Brasil, embora tenha instituído a Política Nacional dos Resíduos Sólidos através de Lei promulgada em 2010, ainda não disponibiliza os meios para a coleta e o adequado tratamento destes resíduos. Este trabalho analisou a incorporação, em pequenas proporções, de resíduos moídos de placas de circuito impresso, como agregados na fabricação de blocos de cimento destinados à função de vedação em construções em alvenaria. O encapsulamento de substâncias perigosas em matrizes cimentícias é técnica de eficácia comprovada para a redução da lixiviação e solubilização de resíduos, quando dispostos em aterros. Ao diluir os resíduos eletrônicos moídos no concreto dos blocos, ocorre o efeito do encapsulamento, com uma destinação final ambientalmente adequada e com menores riscos para o ser humano, tanto no processo de fabricação quanto no emprego dos blocos, durante a fase de construção e na vida útil da edificação. Na parte experimental deste trabalho fabricou-se dois lotes de blocos de concreto de vedação incorporando 1,5 % e 2,0 % do peso dos resíduos eletrônicos de placas de circuito impresso em substituição a igual peso de agregados. Realizados ensaios de laboratório, constatou-se que as características de resistência à compressão, do teor de umidade, de absorção de água e dimensionais, mantiveram-se dentro dos limites impostos pela norma aplicável, indicando a viabilidade da proposta.

Palavras-chave: *Lixo eletrônico, alvenaria de vedação, blocos de concreto, encapsulamento, desenvolvimento de produto sustentável.*

Abstract

Representing the portion of the urban solid waste faster growing worldwide, electronic waste is a cause for concern and studies for containing substances classified as hazardous to humans or the environment, and also for releasing toxic substances when subjected to inadequate procedures to recover metals , including gold and copper , which have the greatest economic advantages . Although Brazil has established a National Policy of Solid Waste through a Law enacted in 2010, it still does not have the means to properly collect and treat this kind of waste. This study examined the incorporation of small amounts of grinded residues from printed circuit boards, as aggregates in the manufacture of cement blocks intended to function as sealing in masonry buildings. The encapsulation of hazardous substances in cementitious matrices is proven an effective technique to reduce the leaching and solubilization of residues when disposed in landfills. By diluting the electronic residues in cement blocks, the encapsulation effect occurs with an appropriate environmental end with lower risks for humans, both in the manufacturing process and in the use of blocks during the construction phase and the lifespan of the building. In the experimental part of this work two batches of sealing cement blocks were manufactured incorporating 1.5 % and 2.0 % of the residues from printed circuit boards replacing equal weight of aggregates. When laboratory tests were performed, it was found that the characteristics of resistance to compression, moisture content, water absorption and dimensional, remained within the limits of the applicable standards, indicating the feasibility of the proposal.

Keywords: *E-Waste, sealing masonry, cement blocks, encapsulation, sustainable product development.*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	XIII
LISTA DE TABELAS	XIV
LISTA DE QUADROS.....	XVII
SIMBOLOGIA.....	XVIII
LISTA DE ABREVIÇÕES E SIGLAS.....	XVIII
1 INTRODUÇÃO	20
1.1 Considerações iniciais.....	20
1.2 Objetivo Geral.....	23
1.3 ObjetivoEspecífico.....	23
1.4 Justificativa	23
1.5 Método de Pesquisa	24
2 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO.....	25
2.1 Um breve histórico da eletrônica moderna em relação aos seus produtos	25
2.2 Hábitos de consumo – descarte dos eletro eletrônicos.....	28
2.3 Lixo eletrônico	30
2.4 Caracterização ambiental dos resíduos eletro eletrônicos	33
2.5 Caracterização das placas de circuito impresso	37
2.6 Processos de reciclagem	47
2.7 Movimentos transfronteiriços do lixo eletrônico.....	57
2.8 Legislação brasileira	59
2.9 Construção em alvenaria.....	63
2.10 Blocos de concreto de vedação	67
2.11 Fábricas de blocos de concreto	73
2.12 Encapsulamento em matriz cimentícia	77
3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	81
3.1 Fluxograma	81
3.2 Obtenção dos resíduos moídos de placas de circuito impresso	82

3.3	Fabricação dos Blocos	87
3.4	Ensaio de Laboratório	88
3.4.1	Determinação da composição granulométrica dos resíduos de lixo eletrônico moídos.....	88
3.4.2	Determinação da massa específica dos resíduos moídos de lixo eletrônico.	90
3.4.3	Análise dimensional dos blocos	91
3.4.4	Teor de umidade dos blocos.....	92
3.4.5	Absorção de água	93
3.4.6	Área bruta e Área Líquida dos Blocos	94
3.4.7	Massa Específica dos Blocos	95
3.4.8	Resistência à compressão dos blocos	95
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	98
4.1	Materiais Utilizados na Fabricação dos Blocos.....	98
4.1.1	Composição granulométrica dos agregados de resíduos eletrônicos	98
4.1.2	Características do cimento utilizado	99
4.1.3	Características da areia.....	100
4.1.4	Características do agregado fino.....	101
4.1.5	Características dos agregados mistos	101
4.1.6	Características da brita	102
4.2	PROPRIEDADES FÍSICAS DOS BLOCOS	103
4.2.1	Ensaio Dimensional dos Blocos.....	103
4.2.2	Massa dos blocos secos ao ar	104
4.2.3	Teor de Umidade dos Blocos	105
4.2.4	Absorção de Água dos Blocos	105
4.2.5	Área Bruta e Área Líquida dos Blocos.....	105
4.2.6	Massa Específica dos Blocos	106
4.2.7	Resistência à Compressão dos Blocos com e sem Adição de Resíduos de Placas de Circuito Impresso	107
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	109

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	111
APÊNDICE 1 – ANÁLISES ESTATÍSTICAS	124
A1.1- O teste ANOVA.....	124
A1.2 - Teste ANOVA com um fator para os pesos dos blocos secos ao ar.....	125
A1.3 – Teste ANOVA com um fator para o teor de umidade dos blocos.....	128
A1.4 – Teste ANOVA com um fator para índice de absorção de água dos blocos. .	131
A1.5 – Teste ANOVA com um fator para a resistência à compressão dos blocos...	134
APÊNDICE 2 – TABELAS DOS RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS ENSAIOS..	138

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Amontoados de equipamentos eletro eletrônicos descartados....	31
Figura 2.2- Placa de circuito impresso antes da montagem dos componentes eletrônicos	39
Figura 2.3- Placa de circuito impresso com os componentes eletrônicos montados.....	39
Figura 2.4 - Conexões <i>wirebonding</i> de um transistor bipolar em montagem PTH (<i>Pin Through Hole</i>).....	46
Figura 2.5 - Conexões <i>wirebonding</i> em um <i>chip</i> de alta densidade para montagem SMD (<i>Surface Mounting Device</i>).....	46
Figura 2.6–Diagrama mostrando em corte a posição de fios de ouro fazendo as ligações elétricas entre o <i>chip</i> semiconductor e os terminais de solda (<i>solderball</i>).....	47
Figura 2.7 - Perfil típico de faca rotativa de um triturador, observando-se o formato hexagonal do furo.	50
Figura 2.8 - Triturador de facas rotativas de dois eixos, com duplo acionamento através de moto-redutores planetários.	51
Figura 2.9- Câmara de moagem de um moinho de martelos.....	52
Figura 2.10 - Moinho de martelos com ciclone e filtro de mangas.	53
Figura 2.11- Pirâmides de Gizé (esq), e Coliseu Romano (dir)	64
Figura 2.12 - Catedral de NotreDame - Paris (esq) e Monadnock Building- Chicago (dir) ...	65
Figura 2.13- Bloco de cimento vazado para vedação - Módulo 10.....	70
Figura 2.14 - Molde para blocos de concreto.	74
Figura 2.15 - Evolução do adensamento em função do tempo de aplicação e da direção de vibração..	75
Figura 2.16 - Resistência à compressão dos blocos de concreto, em função dos diferentes tipos de acionamento das vibro-prensas.....	77
Figura 3.1- Fluxograma do planejamento experimental.....	81
Figura 3.2 - Amostras das placas de circuito impresso em fibra de vidro (esq) e fenolite (dir).	83
Figura 3.3 - Placas após trituração.....	84
Figura 3.4 - Partes, separadas após o processo de trituração por conterem partes metálicas em alumínio, ferro, ferrite e fios de cobre de maiores dimensões e/ou peso.	84
Figura 3.5 - Resíduos de placas de circuito impresso após processo de moagem em moinho de martelos – Fração pesada - Primeiro ajuste – peneira grossa.....	85
Figura 3.6- Resíduos de placas de circuito impresso após processo de moagem em moinho de martelos – Fração pesada - Segundo ajuste – peneira fina.	86

Figura 3.7 - Fração leve dos resíduos de placas de circuito impresso após moagem em moinho de martelos.....	86
Figura 3.8 - Prensa vibratória hidráulica para a fabricação dos blocos :	87
Figura 3.9- (a) Pesagem do material(b) Conjunto de Peneiras no agitador mecânico (c) Controle do agitador mecânico.....	89
Figura 3.10 - Amostras utilizadas: Fração pesada (esquerda) e fração leve (direita).....	90
Figura 3.11 - Frasco Chapman	91
Figura 3.12 - Medição das dimensões externas dos blocos.....	92
Figura 3.13 - Secagem dos blocos em estufa (esq) e pesagem (dir).....	93
Figura 3.14 - Medição da massa aparente com o bloco imerso em água, estando a balança suspensa em suporte e com prato mergulhado no tanque, em montagem hidrostática.	94
Figura 3.15- Blocos preparados para ensaios de compressão através do capeamento com pasta de cimento nas duas faces de assentamento.	96
Figura 3.16 - Prensagem do bloco em prensa hidráulica com controle da taxa de crescimento da força aplicada.	97
Figura 3.17 - Bloco rompido após ser atingido o limite de resistência à compressão.....	97
Figura 4.1: Curvas granulométricas das frações leve, pesada e do total dos resíduos eletrônicos.....	99
Figura 4.2: Curvas granulométricas dos resíduos eletrônicos e dos agregados.....	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição por peso (%) de materiais de placas de circuito impresso selecionadas.....	43
Tabela 2.2 - Valores de ensaio a partir das análises por ICP-OES e ICP-MS de resíduos moídos de placas de circuito impresso a partir de condições diferentes de digestão [mg/kg].	44
Tabela 2.3 - Requisitos para resistência característica à compressão, absorção de água e retração linear por secagem para os blocos vazados.	68
Tabela 2.4 - Retração linear dos blocos em função do teor de umidade relativa do ar.	69
Tabela 2.5 - Dimensionamento dos blocos de concreto.	70
Tabela 2.6 - Dimensões mínimas das espessuras das paredes em função da classe.....	71
Tabela 3.1 - Amostragem de placas de fibra de vidro montadas e sem montar.	83
Tabela 3.2- Série de Peneiras - abertura em mm de cada malha	88
Tabela 4.1 - Valores obtidos no ensaio - Frações Leve e Pesada.....	98
Tabela 4.2- Valores de ensaio de granulometria para os resultados combinados das frações leve e pesada dos resíduos eletrônicos	99
Tabela 4.3- Dimensão máxima característica e módulo de finura.....	99
Tabela 4.4 - Características do cimento.....	100
Tabela 4.5: Frações obtidas no peneiramento da areia.	100
Tabela 4.6: Frações obtidas no peneiramento do agregado fino.	101
Tabela 4.7: Frações obtidas no peneiramento dos agregados mistos.	101
Tabela 4.8: Frações obtidas no peneiramento da brita.	102
Tabela 4.9: Ensaio Dimensional dos Blocos – Dimensões Externas	103
Tabela 4.10: Ensaio dimensional dos blocos – Dimensões das paredes	103
Tabela 4.11: Ensaio dimensional dos blocos – Dimensões dos furos	104
Tabela 4.12: Massa dos blocos secos ao ar.	104
Tabela 4.13: Teor de umidade dos blocos	105
Tabela 4.14: Absorção de água dos blocos.....	105
Tabela 4.15: Comparativo dos resultados dos ensaios de absorção de água por blocos sem e com a adição de resíduos.....	105
Tabela 4.16: Área bruta e área líquida dos blocos.....	106
Tabela 4.17: Massa específica dos blocos	106
Tabela 4.18: Comparativo entre os blocos com e sem adição de resíduos eletrônicos para as massas específicas seca ao ar e saturada.	106
Tabela 4.19: Resistência à compressão dos blocos com e sem adição de resíduos de placas de circuito impresso	107

Tabela 4.20: Comparativo entre os blocos com e sem adição dos resíduos de placas de circuito impresso.....	107
Tabela 4.21 – Resultados dos ensaios de massa específica dos agregados e resíduos.....	108
Tabela A.1: Ensaios dimensionais dos blocos tipo A – 0 % de resíduos.	138
Tabela A.2: Ensaios dimensionais dos blocos tipo B – 1,5 % de resíduos.	138
Tabela A.3: Ensaios dimensionais dos blocos tipo C – 2,0 % de resíduos.	138
Tabela A.4: Ensaios de ruptura sob compressão dos blocos tipo A – 0 % de resíduos.	139
Tabela A.5: Ensaios de ruptura sob compressão dos blocos tipo B – 1,5 % de resíduos.....	139
Tabela A.6: Ensaios de ruptura sob compressão dos blocos tipo C – 2,0 % de resíduos.....	139
Tabela A.7: Massa dos blocos secos em estufa – M1.	139
Tabela A.8: Massa dos blocos saturados de água – M2	140
Tabela A.9: Massa dos blocos secos ao ar – M3.....	140
Tabela A.10: Massa aparente dos blocos (imersos em água) – M4.	140

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1- Definições para lixo eletrônico	31
Quadro 2.2 - Substâncias perigosas, uso, exposição e efeitos à saúde.....	37
Quadro 2.3- Alguns tipos comuns de materiais de placas de circuito impresso e suas nomenclaturas segundo a <i>National Electric Manufacturers Association</i> – NEMA.....	42
Quadro 2.4- Constituintes típicos do laminado tipo FR-4.....	42
Quadro 2.5 - Processos de separação mecânica baseados nas características elétricas dos materiais.	55
Quadro 2.6- Comportamento do concreto submetido à vibração mecânica.....	76
Quadro 2.7 - Tipos de prensas utilizados para a fabricação de blocos de concreto.	76

SIMBOLOGIA

cm	Centímetro
α	Fator de confiabilidade – alfa – da análise ANOVA
g	Gramma
Hz	Hertz
A (%)	Índice de absorção de água
f_{bk}	Índice de resistência à compressão característica
f_{bm}	Índice de resistência à compressão média
ρ_{H_2O}	Massa específica da água
MPa	Mega Pascal
m	Metro
mg	Miligrama
ml	Mililitro
mm	Milímetro
ng/l	Nanograma por litro
pg/m^3	Picograma por centímetro cúbico
kg	Quilograma
km	Quilometro
s	Desvio padrão de amostra

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

ABINEE	Associação Brasileira da Indústria Eletro Eletrônica
AFNOR	<i>Association Française de Normalisation</i>
ARI	Alta resistência inicial
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BFR	<i>Bromated flame retardant</i>
CD	<i>Compact Disk</i>
CETESB	Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo
CI	Circuito Integrado
CLP	Controlador Lógico Programável
CP	Cimento Portland
FR	<i>Flame retardant</i>
GPS	<i>Global positioning system</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Normas Brasileiras
NM	Normas Mercosul
PABx	<i>Private automatic branch exchange</i> (Central telefônica privada)
PBB	Bifenilpolibromatado
PBDE	Éter Difenilpolibromatado
PTH	<i>Pin Through Hole</i>
RCB	Retardante de chamas bromatado
REEE	Resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos
RAEE	<i>Residuos de aparatos eléctrico electrónicos</i>
RoHS	<i>Restriction on certain hazardous substances</i>
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SMA	Secretaria de Estado do Meio Ambiente do Estado de São Paulo
SMD	<i>Surface Mount Device</i>

SNVS	Sistema Nacional de Vigilância Sanitária
SPLP	<i>Standard precipitation leaching procedure</i>
STEP	<i>Solving the e-waste problem</i>
SUASA	Sistema Único de Atenção à Saúde Agropecuária
TBBPA	Tetrabromobisfenol-A
TCLP	<i>Toxicity characteristic leaching procedure</i>
TIC	Tecnologia da Informação e Comunicação
TRC	Tubo de raios catódicos
UL	<i>Underwrite Laboratories</i>
UNEP	<i>United Nations Environment Programm</i>
USEPA	<i>United States Environment Protection Agency</i>
WEEE	<i>Waste of electrical and electronic equipment</i>
Wi-Fi	<i>Wi-Fi Alliance</i> – (Dispositivos de rede local sem fios)
WWW	<i>World Wide Web</i>

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O lixo eletrônico, fruto do enorme desenvolvimento da indústria eletrônica em sua multiplicidade de aplicações, das massivas ações de marketing dos fabricantes e revendedores, e dos hábitos de consumo da sociedade moderna, é a fração do lixo sólido municipal que vem apresentando o maior crescimento anual na maioria dos países (OLIVEIRA, 2012), com volumes estimados da ordem de 20 a 50 milhões de toneladas, já compreendendo mais de 5% dos resíduos sólidos urbanos (UNEP, 2007). Acompanhando este crescimento está a preocupação em se dar um destino ambientalmente correto a este material que, pelas características dos seus elementos constituintes, pode apresentar elevado grau de toxicidade (GERBASE *et al.*, 2012).

O lixo eletrônico é chamado muitas vezes de “minério urbano”, dada a alta concentração de metais nele presente e contida dentro do ambiente das cidades. A sua reciclagem permite a recuperação de uma vasta gama de elementos, o que geralmente ocorre com maior eficiência energética do que nos processos empregados na obtenção destes elementos quando presentes nos minérios, tal como são disponibilizados pela natureza (PARSONS, 2006). E, do ponto de vista econômico-financeiro, também muitas das operações de reciclagem se apresentam como muito vantajosas quando devidamente operacionalizadas (PORTUGAL, 2010).

Ocorre, entretanto, que os processos ambientalmente corretos demandam grandes investimentos em equipamentos, o que os tornam viáveis somente a partir de quantidades mínimas do material a ser processado. E a realidade é que esta equação ainda não está bem resolvida, resultando num grande fluxo de lixo eletrônico desde os países mais ricos, que também são os maiores geradores, para os países mais pobres, onde o processamento se dá sem os devidos cuidados ambientais e de proteção aos trabalhadores, com graves danos para ambos, e apesar da Convenção de Basileia, que proíbe as movimentações transfronteiriças destes resíduos (UNEP, 2009; OLIVEIRA *et al.*, 2012; ROBINSON, 2009).

O Brasil implantou a Política Nacional dos Resíduos Sólidos em agosto de 2010, através da Lei Nº 12.305 (BRASIL, 2010a), onde foi estabelecida a responsabilidade compartilhada de toda a cadeia de fabricação-comercialização, com a obrigação de montar a estrutura necessária de logística reversa que permita o recolhimento do material descartado pelos usuários e o seu encaminhamento para os centros de redistribuição para reuso ou para

plantas de reciclagem. Regulamentada em Dezembro do mesmo ano pelo Decreto Nº 7.404 (BRASIL, 2010b), quando foi criado também o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e decorridos três anos, muito pouco foi feito.

Os grandes magazines, responsáveis por significativa parcela das vendas de eletroeletrônicos, não implementaram sequer o recebimento pelas lojas do material descartado pelos consumidores, um dos primeiros passos da logística reversa, e o Brasil ainda não conta com uma usina de reciclagem. Estava prevista a implantação da primeira unidade na cidade de Sorocaba/SP para o ano de 2013 (DEIRO, 2012). Embora esta usina tenha sido anunciada como uma recuperadora de metais, o seu site divulga que sua atividade se limitará ao recolhimento, pré-processamento e exportação do material para a matriz no Canadá, o que contradiz a notícia inicial (www.erp.com). Lubick (2012) destaca que nesta ocasião havia no mundo apenas cinco plantas de recuperação de metais plenamente capacitadas para processarem de forma adequada todos os componentes tóxicos presentes nas placas de circuito impresso, o que sugere a complexidade de suas implantações, considerando os diversos aspectos envolvidos.

O Ministério do Meio Ambiente do Brasil cogita a prorrogação das metas da Política Nacional dos Resíduos Sólidos, dada a baixa adesão dos municípios, dos quais apenas aproximadamente 20 % haviam elaborado seus planos locais de gestão dos resíduos sólidos até o final do ano de 2012 (MEDEIROS *et al.*, 2013).

Tendo em conta este cenário, o presente trabalho analisa a viabilidade de uma solução alternativa e temporária para o descarte da parte mais crítica do lixo eletrônico, em termos ambientais, que são as placas de circuito impresso, propondo que sejam trituradas e moídas e que o material resultante deste processo seja diluído na composição de blocos de cimento de vedação aplicados na indústria da construção civil.

São diversos os trabalhos que analisaram a incorporação de diferentes materiais ao concreto ou aos blocos de concreto, como Izquierdo (2011), que estudou a incorporação de fibras de sisal; Lima *et al.* (2011) estudaram a substituição do agregado miúdo por resíduos do desdobro de toras de pinus; Mariano (2009), propôs a substituição de areia por espuma rígida de poliuretano pós-consumida; Fioriti (2002), aplicando resíduos de borracha de pneus; Barros *et al.* (2006) e Souza (2001), utilizando entulho da construção civil na fabricação de blocos e Gonçalves (2000), empregando resíduos de corte de granito como aditivo na produção de concreto, entre outras estudos, com conclusões relevantes e que sinalizam que a

diluição dos resíduos de placas de circuito impresso, que se propõe nesta pesquisa, deve se apresentar como uma possibilidade segura.

Os blocos de vedação são destinados ao preenchimento de vãos, sem a função estrutural, e por conta desta finalidade apresentam uma menor especificação de resistência à compressão. Também, devido à sua finalidade, a grande maioria é utilizada na construção de paredes prediais, sejam residenciais, comerciais ou industriais, recebendo uma camada de reboco com posterior aplicação de tinta, sendo ainda que uma significativa parcela destas paredes é destinada às divisões internas das edificações e, portanto, abrigadas das intempéries.

Esta situação, por si, praticamente anula a possibilidade de contaminação ambiental pelos resíduos, além de que a diluição dos resíduos no compósito de matriz cimentícia resulta no encapsulamento deste particulado, criando uma barreira para o eventual contato com a água de chuva ou outras situações que possam provocar a lixiviação (FRANCO, 2011). É importante a ocorrência deste encapsulamento diante da possibilidade futura de demolição da edificação e o descarte do entulho em aterro sanitário, mesmo considerando que é cada vez maior o reaproveitamento do entulho pela própria indústria da construção civil.

Embora ainda não sejam muito difundidos nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste, os blocos pré-moldados de cimento são muito utilizados nas regiões Sul e Sudeste, que concentram as maiores populações com elevada renda per capita e, por consequência, a maior geração de lixo eletrônico, ocorrendo também nestas regiões os maiores índices de construção civil. As fábricas de blocos de cimento, excetuando aquelas de grandes centros que contam com estruturas automatizadas, são na sua maioria micro ou pequenas empresas que atendem as próprias localidades e as regiões nos seus entornos (SILVA, 2011).

Uma residência popular típica, de 42 m², com cinco cômodos e uma área de paredes de 96,41 m², com dois quartos, sala, cozinha e banheiro, distribuídos numa planta usual adotada pelos loteamentos de programas habitacionais (CEF-GIDUR/VT, 2007) demanda por 1.250 blocos de vedação do módulo M10 - NBR 6136 (39 cm x 19 cm x 9 cm), ao peso médio de 10 kg (CRABI, 2013), totalizando 12.500 kg. Se forem incorporados na fabricação de cada bloco 1 % do seu peso (100 gramas) de resíduos de placas de circuito impresso em substituição a igual peso de agregados, uma única residência nestas dimensões será capaz de conter os resíduos de 125 kg de placas. Uma cidade de 100.000 habitantes produz anualmente uma quantidade estimada de 4 kg de lixo eletrônico por habitante (WALDMAN, 2007), totalizando 400.000 kg, dos quais as placas de circuito impresso correspondem de 3 % a 7 % do peso (GUO, 2008; ROBINSON, 2009), ou seja, 28.000 kg (tomando o percentual maior,

de 7 %), que seriam diluídos por 280 milheiros de blocos, o que é apenas uma fração da quantidade total de blocos consumida pela construção civil numa cidade deste porte.

Assim, esta proposta pretende analisar a possibilidade de uma alternativa simples e de aplicação local para o descarte da fração do lixo eletrônico que apresenta maior risco ambiental, a ser utilizada enquanto não são implantadas no Brasil as unidades de reciclagem de metais e não são consolidados os processos de logística reversa. Dada a existência de muitas fábricas de blocos, esta alternativa envolve baixo consumo de combustíveis fósseis para a movimentação de materiais, uma vez que deverão ser pequenos os percursos entre os pontos de concentração do lixo eletrônico coletado e o seu processamento nas fábricas de blocos. Considera-se ainda que, à medida que sejam instaladas plantas de recuperação de metais, os equipamentos para trituração e moagem dos resíduos eletrônicos poderão ser integralmente aproveitados na cadeia de fornecimento de resíduos moídos para estes recicladores, uma vez que a trituração e a moagem fazem parte das etapas iniciais de todos os sistemas de recuperação de metais, seja por hidrometalurgia, pirometalurgia ou biometalurgia (HUANG *et al.*, 2009).

1.2 Objetivo Geral

Analisar a incorporação de particulados resultantes da moagem, após trituração, de placas de circuito impresso oriundas de aparelhos eletro eletrônicos, na produção de blocos de concreto de vedação para aplicação na construção civil.

1.3 Objetivo Específico

Este trabalho tem o seguinte objetivo específico:

- Analisar a influência dos resíduos de placas de circuito impresso agregados na matriz cimentícia dos blocos de vedação, nas características mecânicas essenciais para a aplicação destes blocos na construção civil, como a absorção de água e resistência à compressão, de acordo com as normas NBR6136 e NBR 12118.

1.4 Justificativa

As ausências de uma estrutura nacional para coleta de lixo eletrônico e de usinas de reciclagem para os materiais contidos nas placas montadas de circuito impresso, e também a perspectiva de que a implantação, tanto de uma quanto de outra, ainda demandem um longo período de tempo, justificam a busca por soluções alternativas de descarte deste material.

Esta alternativa, sendo de aplicação local, na própria região onde o resíduo eletrônico é descartado, deverá reduzir o consumo de combustíveis fósseis empregados no transporte deste material, comparando aos casos em que é remetido para centros de comercialização de resíduos. Também esta destinação, embora não recupere os metais ou outros materiais, proporcionará seu isolamento dos processos naturais de lixiviação que ocorrem quando dispostos em aterros sanitários ou nos lixões ainda existentes, eliminando este risco ambiental, ao mesmo tempo em que impedirá que sejam encaminhados para processos rudimentares de queima ou dissolução química, ambos com alto grau de danos ao meio ambiente e tão comuns em países em desenvolvimento, que não dispõem de usinas de reciclagem, onde são trabalhados por parcelas da população em faixa econômica de baixa renda (UNEP, 2009).

1.5 Método de Pesquisa

Inicialmente foi feita uma revisão bibliográfica, tanto de autores nacionais quanto internacionais, relativa aos diversos temas envolvidos nesta pesquisa. A estruturação do trabalho foi feita a partir do material estudado, com a divisão em diversos itens que sintetizam a fundamentação teórica e abrangem os conceitos principais relativos ao tema da dissertação.

Coletado o material, foi remetido para trituração e moagem em empresas capacitadas para tais funções, na cidade de São Paulo.

O passo seguinte foi a fabricação dos blocos, na empresa Crabi Artefatos de Cimento, que gentilmente aceitou participar deste trabalho de pesquisa, inclusive na execução de ensaios de compressão dos blocos, por meio de testes realizados no seu próprio laboratório.

A seguir foram realizados os demais testes físicos, nos laboratórios da UNIFEI, e feita a análise dos resultados, visando comprovar a hipótese da possibilidade prática da diluição de resíduos moídos das placas de circuito impresso em blocos de vedação, demonstrando que as características físicas são mantidas dentro das exigências das normas aplicáveis.

2 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

2.1 Um breve histórico da eletrônica moderna em relação aos seus produtos

O desenvolvimento da eletrônica nas últimas décadas, tanto nos aspectos científicos quanto tecnológicos, fez que a presença de produtos eletro eletrônicos se incorporasse de forma indissociável na vida das pessoas. No início do século passado os produtos que representavam a grande parcela do consumo eram o rádio e a televisão, com circuitos a válvulas. Uma das grandes invenções do século XX, o transistor, foi um resultado inesperado de pesquisas realizadas em radares para os Estados Unidos e Grã-Bretanha durante a 2ª Guerra Mundial, quando se buscava uma alternativa de estado sólido para as frágeis e caras válvulas, que consumiam muita potência. O advento do transistor ocorreu em 1947 quando William Schokley e os seus colegas Walter Brattain e John Bardeen criaram a primeira unidade, que foi o Transistor de Contato Pontual. Em 1950, Schokley patenteou uma nova solução com características elétricas mais estáveis, que recebeu o nome de Transistor de Junção (ROCHA *et al.* 1985). A chegada em sua forma comercial, no ano de 1953, mostrou tratar-se de um dispositivo que além de mais estável e confiável que a válvula, era mais simples, demandava por frações da potência elétrica requerida pelas válvulas e muito mais barato, o que permitiu o rápido desenvolvimento de uma nova gama de produtos eletrônicos de consumo, que se tornaram leves e transportáveis, pois passaram a funcionar com a energia fornecida por pilhas eletroquímicas.

A portabilidade foi um estímulo à criatividade dos fabricantes, que ofereceram ao mercado uma grande variedade de produtos com *designs* e características atraentes, sugerindo aplicações até então impensadas pelo consumidor (WALSTON *et al.*, 1963). Em 1958, um engenheiro chamado Jack Kilby foi trabalhar para a empresa Texas Instruments, que já possuía uma grande reputação de inovadora. Pesquisando micro-módulos, ele imaginou uma nova técnica na qual, ao invés de empilhar os componentes, os fabricava no mesmo pedaço de material. O primeiro protótipo, fabricado em 1959, era um oscilador de deslocamento de fase. Estava criada a semente para o circuito integrado.

Outros pesquisadores, como Jean Hoerni e Robert Noice desenvolveram novos processos como a difusão e técnicas de interconexão dos microcomponentes, e em 1961 a empresa Fairchild lançava o primeiro circuito lógico, que implementava a função flip-flop em uma única peça. Os Laboratórios Bell desenvolveram processos de oxidação, foto gravação, difusão e corrosão, que levaram à produção dos CI's – Circuitos Integrados- que incorporam numa única pastilha, além dos dispositivos semicondutores ativos, que são os

transistores e diodos, outros elementos de circuito como resistores e capacitores. Diversos centros de pesquisas de empresas além da Bell, como a Texas Instruments, Motorola, Intel, Philips, Siemens, Toshiba, Hitachi, Analog Devices e vários outros, contribuíram para um rápido avanço de novas técnicas de fabricação, que resultaram nos atuais microprocessadores, onde uma única pastilha incorpora os diversos elementos necessários para compor uma unidade de processamento digital. Partindo da LSI – Larga Escala de Integração, com até 1.000 transistores por pastilha, passou-se pela VLSI – Escala de Integração Muito Larga, incorporando de 10.000 a 100.000 transistores, seguindo pela ULSI – Ultra Larga Escala de Integração- de 100.000 a 1.000.000 de transistores, avançando pela SLSI – Super Larga Escala de Integração com até 10.000.000 de transistores numa única pastilha (REZENDE, 2004). Atualmente já existem dispositivos com integração da ordem de bilhão de transistores que, operando em co-processamento, são capazes de realizar centenas de milhões de instruções por segundo. Simultaneamente ao aumento da integração e capacidade de processamento, conquistou-se uma crescente redução de custos, o que foi teorizado em 1965 por Gordon E. Moore, então presidente da Intel, que naquela ocasião profetizou que o número de transistores em um *chip* dobraria a cada dois anos mantendo-se o custo. Este prazo foi posteriormente revisto para 18 meses e desde então a previsão, conhecida como Lei de Moore, tem se verificado na indústria.

São realidades da tecnologia atual a altíssima capacidade de processamento, a enorme diversidade de novos dispositivos aptos a realizar as mais diversas funções, as técnicas de produção e montagem totalmente automatizadas capazes de manipular - sem falhas - micro componentes em grande velocidade e elevadas quantidades, os baixos custos e os constantes desenvolvimentos de softwares mais e mais complexos e de maior facilidade de interface com o ser humano. Tudo isso associado à evolução de novos meios de transmissão de dados, novas formas de codificação e compactação da informação, além da quase onipresença da Internet, que permite o rápido acesso do público a todas as conquistas da tecnologia e lançamentos da indústria, resultaram numa explosão do consumo de dispositivos eletrônicos, que tem maior impacto quanto maior é o poder aquisitivo da população.

São produtos eletrônicos constantes na vida moderna os rádios, televisores, dispositivos miniaturizados de áudio, sistemas de navegação GPS, computadores de mesa, *notebooks*, *tablets*, jogos eletrônicos, reprodutores de CD's, relógios, gravadores, filmadores, câmeras fotográficas digitais, memórias tipo *pen-drive*, modems e roteadores de pequeno porte, sistemas de segurança predial, monitores de vídeo, aparelhos de telefonia celular, sistemas de comutação telefônica, monitores de pressão sanguínea, do nível de açúcar e vários outros

sistemas de uso doméstico ou pessoal relacionados aos cuidados com a saúde, equipamentos de monitoração do clima, de controle de exercícios físicos, de iluminação, de automação predial, etc., compondo uma enorme diversidade de aplicações.

Existe ainda a presença de circuitos eletrônicos, na função de controle, introduzidos em produtos que eram, até algum tempo, caracterizados como equipamentos apenas elétricos. Assim, é notável atualmente a incorporação dos micro controladores e outros circuitos eletrônicos em produtos como refrigeradores e congeladores, condicionadores de ar, máquinas de lavar roupas e de lavar louças, secadoras de roupas, liquidificadores, batedeiras, chuveiros, aquecedores de água a gás e solares, portões de garagem, bombas de água e sistemas de irrigação de jardins e, também aqui, uma enorme variedade de outras funções. Ao terem incorporados os processadores eletrônicos, estes equipamentos passam a ser classificados como produtos “inteligentes”, oferecendo funções de automatismo e programação, que se refletem em uma melhor relação custo-benefício para o usuário e, portanto, um forte apelo para as vendas, o que torna crescente a presença destes produtos nos lançamentos da indústria, formando o que atualmente se chama de eletrônica de consumo

Além dos aparelhos eletro eletrônicos de uso pessoal, em casa ou no trabalho, existe uma infinidade de outros equipamentos eletrônicos mais especializados que cobrem uma extensíssima gama de aplicações. Entre eles, os sistemas embarcados em veículos automotores, os equipamentos para eletromedicina e aplicações para laboratórios de análises clínicas e consultórios dentários. Na área de processamento de dados são empregados muitos milhões de computadores, impressoras, dispositivos de armazenamento e periféricos de computadores, roteadores, *switchers*, *hubs* e sistemas de energia de emergência. Na indústria, em todos os ramos, são infindáveis os sistemas de controle e monitoração, equipamentos de metrologia, as máquinas operatrizes controladas por computador e os robôs industriais. Os mais variados equipamentos eletrônicos estão presentes em importantes funções na aviação, na navegação marítima, na agricultura, nos laboratórios de pesquisa. Encontram-se também nas telecomunicações, totalmente eletrônicas, tanto nos produtos destinados ao usuário final, onde atualmente se destacam os aparelhos de telefonia celular, como naqueles que equipam as centrais de transmissão e comutação, seja por cabos, fibra-óptica, rádio enlaces terrestres ou comunicação via satélite.

Por outro lado, governo e empresas progressivamente oferecem mais serviços pela internet. A utilização do computador para aquisição de produtos, compra de passagens, realização de transações bancárias, entrega de formulários fiscais, emissão de notas e

documentos contábeis, envio de resultados de exames clínicos laboratoriais, acompanhamento de desempenho escolar, pesquisas bibliográficas, remessa de projetos de engenharia e arquitetura, entre tantos, são alguns poucos exemplos de uma transformação contínua que deixa as pessoas a cada dia mais dependentes do uso da informática. Assim, constata-se que a presença de equipamentos eletrônicos na vida moderna é total e em escala mundial, excetuando os países muito pobres, onde o acesso a estes produtos ainda fica limitado a uma parcela mais restrita da população (UNEP, 2009).

2.2 Hábitos de consumo – descarte dos eletro eletrônicos

Em seu livro “*The Waste Makers*” publicado no ano de 1960, Vacen Packard chamou a atenção para o conceito de Obsolescência Programada, descrita como “o encurtamento deliberado da duração dos produtos”. O aumento da geração de resíduos de produtos pós-consumo relacionados na categoria de bens duráveis, onde se destacam os eletro-eletrônicos, tem sido apontado como uma das consequências da chamada obsolescência planejada, que é constatada pela redução dos tempos de vida útil dos bens ao longo das últimas décadas (RODRIGUES, 2012).

A Destruição Criativa, ou Destruição Criadora, é um conceito de economia popularizado pelo economista austríaco Joseph Schumpeter em seu livro *Capitalismo, Socialismo e Democracia*. Para Schumpeter (1942), a essência do capitalismo é dinâmica, e um capitalismo ‘estático’ seria uma contradição. Esse mesmo autor estabelece cinco casos de inovação: a introdução de um novo bem, a introdução de um novo método de produção ou de comercialização dos ativos existentes, a abertura de novos mercados, a conquista de uma nova fonte de matérias primas e a criação de um novo monopólio.

Uma análise do mercado de produtos eletro eletrônicos de consumo, como os da linha de produtos digitais de computação, mostra claramente o dinamismo descrito pelo autor no lançamento de novos produtos, criando necessidades até então inexistentes e de alguma forma influenciando o consumidor, que passou a ter uma nova relação, de desapego, com os produtos que adquire, que agora descarta antes do fim de suas vidas úteis, mesmo estando em perfeitas condições de uso e cumprindo integralmente todas as funções originais.

Estes produtos são substituídos por novos modelos em função de características mais avançadas, de design inovador, de menor consumo de bateria e maior autonomia, de maiores velocidades de processamento, de maiores capacidades de memória, de menores dimensões e peso, etc., que são trocados por novos modelos mesmo que não exista a real necessidade da

troca, e mesmo que estas novas características acrescentem muito pouco à utilização que se faz dos equipamentos. Segundo Prado (2012), Tecnologia de Informação e Comunicação (TIC) é o pavimento da sociedade moderna do século XXI. A funcionalidade do ambiente humano está, em parte, baseada em dispositivos (elétricos e eletrônicos) cujas características permitem interações sociais pessoais e/ou de negócios, local ou globalmente. A Tecnologia da Informação e Comunicação é a raiz da revolução tecnológica, ou revolução das novas mídias ou da Sociedade da Informação. Revolução esta que trouxe mudanças significativas para a cultura humana, mudando a maneira como os indivíduos vivem com eles mesmos e com os outros, e como interagem em sociedade. Esta revolução deixou para trás o modelo anterior de produção e consumo e deu vida a um novo, baseado em pelo menos três tópicos: conectividade global, produção em espaços geográficos distantes da instalação originária da empresa e consumo descartável.

São vários os autores que mencionam o termo ‘obsolescência programada ou planejada’ (SLADE, 2007; COOPER, 2004) como uma ação deliberada da indústria capitalista que, ao reduzir o tempo de vida útil dos bens que produz, provoca a crescente produção de resíduos de produtos pós-consumo pertencentes à categoria dos bens duráveis, onde se destacam os eletro eletrônicos.

Quando se analisam produtos de aplicação industrial em comparação aos produtos de consumo, embora com ciclos de vida maiores, a substituição dos equipamentos também ocorre majoritariamente pela inovação, que leva fatalmente à descontinuação de equipamentos e tecnologias. Costa *et al.* (2010), em um estudo sobre o descarte de equipamentos eletrônicos em uma empresa de telecomunicações, mostram que o período de declínio de uma tecnologia traz muitos problemas de operação, tendo identificado cinco principais: falta de sobressalentes; alto custo de reparos devido à escassez de mão de obra especializada; alto índice de falhas, que em redes interligadas aumenta com o crescimento da diferença do estágio de desenvolvimento das tecnologias; longos períodos de indisponibilidade em função da dificuldade de repor os componentes e de providenciar o reparo e a sobrevalorização dos componentes à medida que se tornam escassos.

Rodrigues (2012), estudando os motivos que levam ao fim de vida útil de um produto, agrupou e sintetizou diferentes tipos de obsolescência:

Obsolescência técnica ou tecnológica: relacionada a atributos determinados pelos fabricantes no âmbito do projeto dos produtos e fabricação de componentes, correspondentes às seguintes estratégias:

- Projeto considerando a redução da durabilidade (encurtamento da vida útil);
- Inviabilidade da manutenção, embora os proprietários possam escolher se desejam ou não reparar os seus produtos. Estratégias são utilizadas para inviabilizar a escolha (difícil disponibilização de peças, desincentivo aos serviços de manutenção);
- Inovações tecnológicas profundas: produtos com tecnologia de introdução recente que têm por objetivo substituir completamente os produtos antigos (modo de transmissão TV digital, reproduzidor de novas mídias CD, DVD, *Blu-Ray*).

Obsolescência psicológica: associada aos atributos determinados pelos fabricantes no domínio do projeto e, adicionalmente, à utilização de estratégias de marketing. Correspondem a inovações que não alteram substancialmente a funcionalidade dos produtos (aparência, funções adicionais para o mesmo produto), mas que aliados à estratégia de marketing, interferem diretamente na percepção dos usuários, criando novas necessidades que podem relacionar-se, por exemplo, à moda ou à conquista de status.

2.3 Lixo eletrônico

A palavra lixo tem sua origem na palavra latina *lix*, cujo significado é “cinzas”. Segundo Aurélio (1988), lixo “é tudo que não presta e se joga fora; coisa ou coisas inúteis, velhas, sem valor, resíduos que resultam das atividades domésticas, industriais e comerciais”. A Secretária de Estado do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SMA) e a Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) entendem por resíduo, ou lixo, “todo e qualquer material sólido proveniente das atividades diárias do homem em sociedade, cujo produtor ou proprietário não o considere com valor suficiente para conservá-lo”. Quando se trata de produtos cujos funcionamentos dependam da eletricidade, estes resíduos recebem a denominação de lixo eletrônico (Figura 2.1).

Diversos autores adotam também a sigla REEE (Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos) ou RAEE (*Resíduos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos*), muito encontrada nos textos oriundos dos países de língua espanhola e nos trabalhos de brasileiros (PORTUGAL, 2010; PETTER, 2012; AYALA, 2010; MONTEVERDE, 2010; PROTOMASTRO, 2010).

Nos Estados Unidos, de modo geral, denomina-se lixo eletrônico, em inglês *E-Waste* ou *Electronic Waste* (USEPA, 2008), enquanto que os países europeus tratam por Lixo de Equipamento Eletro eletrônico (WEEE – *Waste Electrical and Electronic Equipment*).

No quadro 2.1 são apresentadas algumas definições para o Lixo Eletrônico, adotadas por diferentes entidades.



Figura 2.1 - Amontoados de equipamentos eletro eletrônicos descartados.

Fonte: www.smh.com.au, consultado em 20/9/2013.

Quadro 2.1- Definições para lixo eletrônico

Referência	Definição
União Européia – <i>WEEE Directive</i> (EU, 2002)	Equipamentos elétricos ou eletrônicos levados ao lixo, incluindo todos os componentes, sub-montagens e consumíveis que são partes dos produtos no momento do descarte.
<i>Basel Network Action</i> (2002)	Lixo Eletrônico compreende uma larga e crescente faixa de dispositivos eletrônicos desde grandes aplicações domésticas como refrigeradores e condicionadores de ar a telefones celulares e aparelhos de áudio, e de eletrônica de consumo a computadores, que tenham sido descartados pelos seus usuários.
Organização para o Desenvolvimento e Crescimento Econômico- OECD (2001)	Qualquer aplicação que utilize energia elétrica e que tenha atingido o seu fim de vida.
SINHA (2004)- Deepli Sinha – Consultor	Uma aplicação que funciona com eletricidade e que não satisfaça mais o atual proprietário em relação à sua finalidade original.
StEP (2005) – <i>Solutions to E-Waste Problem</i> -Programa das Nações Unidas	Lixo Eletrônico se refere à cadeia reversa de fornecimento que recolhe produtos não mais desejados por um dado consumidor e o reforma para outros consumidores, recicla ou processa o descarte final.

Fonte: UNEP, 2009

A definição de equipamento elétrico e/ou eletrônico tem variações, mas de modo geral é coincidente na essência. A Diretiva 2002/96 (EUROPEAN UNION, 2003) o faz da seguinte forma: “equipamento elétrico ou eletrônico significa equipamento que é dependente de correntes elétricas ou campos magnéticos para que possa funcionar corretamente, e equipamento para geração, transferência e medição de tais correntes e campos”.

A ABINEE (Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica) faz uma divisão setorial dos produtos eletro eletrônicos em dez áreas (ABINEE, 2010):

- Automação Industrial;

- Componentes Elétricos e Eletrônicos;
- Equipamentos Industriais;
- Geração Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica;
- Informática;
- Material Elétrico de Instalação;
- Serviço de Manufatura em Eletrônica;
- Equipamentos de Segurança Eletrônica;
- Telecomunicações;
- Utilidades Domésticas Portáteis.

Já a Comunidade Européia divide em dez diferentes segmentos (EUROPEAN UNION, 2003):

- Grandes aplicações domésticas: refrigeradores, máquinas de lavar roupas, lavadoras de louças, fornos de micro-ondas, aquecedores elétricos, condicionadores de ar.
- Pequenas aplicações domésticas: aspiradores, torradeiras, cafeteiras, secadores de cabelo, relógios, ferros de passar e outras aplicações.
- Equipamentos de TI e Telecomunicações: computadores *desktops*, computadores *laptops*, impressoras, copiadoras, aparelhos de fax, calculadoras, telefones, telefones celulares, *tablets* e outros.
- Equipamentos para o consumidor: rádios, televisores, vídeo câmeras, máquinas fotográficas digitais, amplificadores de áudio, projetores de vídeo e outros.
- Equipamentos de iluminação: lâmpadas fluorescentes e lâmpadas de descarga de alta-densidade.
- Ferramentas elétricas e eletrônicas: furadeiras, serras, parafusadeiras, e equipamentos de jardinagem.
- Brinquedos, hobby e esportes: vídeo games, trens elétricos, jogos de corrida de automóveis e outros.
- Dispositivos médicos: equipamentos de radioterapia, aparelhos de diálise, ventiladores pulmonares e outros.
- Instrumentos de monitoração e controle: sensores de fumaça, termostatos, reguladores de aquecimento e outros.
- Dispensadores automáticos: dispensadores automáticos para bebidas quentes, produtos sólidos, garrafas, latas e dispensadores de dinheiro.

A evolução das funções de automação e controle eletrônicos tem expandido a presença de circuitos eletrônicos nos mais diversos tipos de eletrodomésticos, de forma que

equipamentos que até algum tempo eram tipicamente classificados como apenas elétricos, por exemplo, os condicionadores de ar, refrigeradores, máquinas de lavar e secar, passaram a ser incluídos em ambas as categorias. Estes equipamentos, que não empregavam placas de circuito impresso, passaram a incorporar os circuitos de controle e automação, mudando sua participação na geração de resíduos perigosos ou de resíduos capazes de produzir contaminação ambiental, por passarem a conter componentes até então não utilizados. A incorporação destes dispositivos trouxe implicações também nos processos de desmanche e descarte.

São muitos os autores que mencionam a escassez de dados confiáveis sobre o montante de lixo eletrônico que é produzido no mundo, trabalhando-se com a estimativa feita pela UNEP (2009) de que o volume anual de todos os países está entre 20 e 50 milhões de toneladas (OLIVEIRA C.R. *et al.*, 2012; HUANG *et al.*, 2009).

Raymond (2003) mencionava que medições do ano 2000, nos EUA, davam conta de que o lixo eletrônico não ultrapassava o limite de 4 % de todo o lixo sólido urbano em peso, mas que o rápido desenvolvimento da tecnologia e o fato de que a cada dia se torna mais atraente substituir um equipamento do que consertá-lo, do ponto de vista dos custos, leva a um rápido crescimento do descarte de produtos eletro eletrônicos.

Entretanto, uma parcela estimada em 75 % dos produtos em lugar de serem descartados imediatamente após deixarem de ser utilizados, permanecem em gavetas e garagens domésticas ou em depósitos das empresas, o que falseia as medições do descarte (USEPA 2008). Kasper (2011), em estudo sobre a reciclagem de celulares, trabalha com a estimativa de que o lixo eletrônico representa 5 % dos resíduos sólidos urbanos, e que parte fica guardada em casa ou depósitos a espera da disposição final.

2.4 Caracterização ambiental dos resíduos eletro eletrônicos

Amparados pela Lei 12.305/2010 (BRASIL, 2010a), os órgãos ambientais brasileiros têm demonstrado um cuidado especial no que se refere à utilização e manuseio dos resíduos sólidos industriais e de origem industrial. Os possíveis riscos de problemas ambientais, assim como as eventuais punições previstas na Lei de Crimes Ambientais, devem ser evitados pela obediência criteriosa às disposições legais que orientam o trato com estes resíduos.

As normas técnicas ABNT NBR 10004, NBR 10005 e NBR 10006, editadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), definem e classificam os resíduos sólidos industriais, caracterizados nos estados sólido e semi-sólido.

A norma NBR 10007 (ABNT, 2004) determina os procedimentos de amostragem dos resíduos sólidos para a coleta de material para os ensaios. Todo o gerenciamento dos resíduos industriais e as decisões técnicas e econômicas necessárias em todas as fases do gerenciamento devem estar baseados na classificação ambiental dos resíduos, considerando o seu potencial de contaminação em curto, médio e longo prazos (BARROS, 2013).

Os resíduos podem ser classificados, de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), nas seguintes classes: Resíduos Classe I - Perigosos; Resíduos Classe II - Não Perigosos, sendo: Resíduos Classe IIA - Não Inertes e Resíduos Classe IIB - Inertes.

Os resíduos caracterizados como Classe I – Perigosos, são aqueles que em função de suas propriedades de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, podem oferecer riscos à saúde pública, contribuindo para um aumento de mortalidade ou incidência de doenças e/ou apresentar efeitos danosos ao meio ambiente quando manuseados ou dispostos de maneira inadequada (ABNT, 2004).

O Anexo F da norma NBR 10005 (ABNT, 2004) identifica os resíduos como perigosos devido à sua toxicidade, conforme os ensaios de lixiviação realizados como prescrito na norma.

O ensaio de lixiviação procura reproduzir em laboratório os fenômenos de arraste, diluição e dessorção que ocorrem pela passagem do material solvente através do resíduo, servindo para avaliar o potencial deste resíduo em liberar certas espécies químicas de características tóxicas, buscando simular o processo natural que ocorre quando resíduos são depositados em aterros sanitários ou lixões. A lixiviabilidade é usualmente avaliada em função da concentração dos contaminantes encontrados no lixiviado. A concentração do contaminante, padrão primário de avaliação de qualidade da água, é frequentemente utilizada como padrão para o teste de lixiviação. Na avaliação da lixiviabilidade do material é feita uma comparação entre a concentração do contaminante no lixiviado e no resíduo bruto. Estes valores indicam a porção de resíduo liberada para o meio. Se o tempo de duração do ensaio é conhecido, então é possível determinar-se a taxa de lixiviação do resíduo. O ensaio de lixiviação sofre interferência da temperatura, do tipo de solução lixivante, da relação resíduo/lixivante, do número de extrações, da superfície específica do resíduo e do grau de agitação utilizado no ensaio, sendo vários os métodos disponíveis internacionalmente e adotados por diferentes países. Cauduro *et al.*, (2002) realizaram um trabalho de comparação de quatro métodos analisando amostras sintetizadas em laboratório com base em cimento e os sais de metais pesados: Nitrato de Chumbo, Sulfato de Níquel, Sulfato de Zinco, Sulfato de

Cádmio e Sulfato de Cromo. Analisando de forma comparativa a norma brasileira NBR 10005 (ABNT, 1987), a norma francesa AFNOR X-31-210/92 – *Essai de Lixiviation* e as americanas ASTM D 6234/98 – *Standard Method for Shake Extraction of Mining Waste by the Synthetic Precipitation Leaching Procedure* e EPA 1311/93 - *TCLP – Toxicity Characteristic Leaching Procedure*, os resultados mostraram aspectos diferentes de cada método, destacando que o método ASTM utiliza um meio lixiviante mais agressivo com a produção de extratos lixiviados de maior concentração para certos metais, concluindo contudo, que nenhum deles é capaz de reproduzir, isoladamente, todas as condições variáveis que se observam na natureza. Estes resultados serviram de subsídios para o aprimoramento da NBR 10005 em sua edição de 2004.

A questão do impacto na qualidade da água causado pela disposição de lixo eletrônico em aterros sanitários tem sido alvo de posições divergentes, como descrito por Lee *et al.* (2009), quando a administração da agência ambiental americana USEPA (*United States Environmental Protection Agency*) declarou que os ensaios demonstraram que os metais pesados, originados nos eletrônicos dispostos nos aterros, faziam contribuições sem consequências de periculosidade para a sua concentração no extratos lixiviados produzidos nos aterros municipais. Enquanto que outros autores, como Kaufman (2009), sugeriam que seria prudente que os órgãos de proteção à saúde e às águas subterrâneas viessem a proibir a disposição deste tipo de resíduo nesses aterros, dado o risco de contaminação por lixiviação.

Zhou *et al.* (2013), estudando as características de lixiviação de metais pesados e retardantes de chama bromatados presentes em placas de circuito impresso originadas de lixo eletrônico, utilizaram os métodos de digestão assistida por microondas para obter os extratos TCLP/SPLP de metais pesados e de retardantes de chama bromatados (RCB), de acordo com o métodos USEPA 3052 e 3015-A, respectivamente. Para a medição dos retardantes de chama PBDE e TBBPA utilizaram um método modificado de acordo com os trabalhos de Kim *et al.* (2006). Estes estudos demonstraram que tanto os metais pesados quanto os RCB são lixiviados em alguma extensão a partir dos resíduos de placas de circuito impresso, sendo que para os metais pesados as maiores concentrações ocorreram para o cobre, utilizando ambos os métodos (TCLP e SPLP), e que o chumbo excedeu o limite regulatório quando medido pelo extrato TCLP. Foram detectados cinco diferentes metais e suas concentrações seguiram a ordem Cu>Pb>Zn>Cd>Ni. Os retardantes de chama PBDE e TBBPA estiveram ausentes nos extratos obtidos pelos métodos TCLP e SPLP, mas suas características foram observadas quando utilizados os métodos modificados. Os pesquisadores concluíram que a lixiviação dos RCB depende fortemente do meio extrator e que a disposição de placas descartadas de

circuito impresso em aterros sanitários ou em *dump-sites* representa uma significativa fonte de emissão de metais pesados e RCB's.

Kidee *et al.* (2013) realizaram um extenso trabalho de análise dos extratos lixiviados de placas de circuito impresso inteiras e quebradas em condições que simularam, em laboratório, os aterros sanitários em termos dos componentes dos resíduos, dos métodos de descarte do lixo eletrônico e com precipitação de chuva realística. Foram estudados os RCB e quatorze elementos por um período de 21 meses. Os resultados demonstraram que as concentrações médias de alumínio (Al), arsênio (As), bário (Ba), berílio (Be), cádmio (Cd), cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu), ferro (Fe), níquel (Ni), chumbo (Pb), antimônio (Sb), vanádio (V) e zinco (Zn) nos lixiviados das colunas que continham partes quebradas de lixo eletrônico eram significativamente mais elevadas que as mesmas concentrações dos lixiviados das colunas que não continham lixo eletrônico. O BDE-153 foi o BDE de maior valor médio encontrado em todas as colunas, mas a somatória dos níveis de BDE das colunas que continham lixo eletrônico intacto foram de 3,7 ng/l o que não era significativamente maior que os níveis dos lixiviados encontrados em outra colunas. Em sua conclusão declaram que, embora os ensaios tenham mostrado que a concentração de chumbo nos lixiviados obtidos na simulação dos modernos aterros sanitários não atingisse níveis de preocupação ambiental em relação aos níveis regulatórios, não se poderia afirmar que maiores volumes de lixo eletrônico manteriam ainda os mesmos resultados, e que o período de estudos de 21 meses mostrou um lento, mas contínuo carregamento das águas subterrâneas, mesmo considerando que as concentrações estudadas se mostraram baixas.

O ensaio de solubilização mede a capacidade de uma substância de se dissolver em outra, e é empregado na caracterização de resíduos sólidos para diferenciar os resíduos classificados na norma ABNT NBR 10004 como Classe IIA - Não inertes e Classe IIB – Inertes, e os procedimentos para a realização do ensaio estão determinados pela norma ABNT NBR 10006.

Os resíduos eletro eletrônicos, alvos deste presente trabalho, são caracterizados de acordo com as normas NBR 10005 e NBR 10006.

Quadro 2.2, do item 2.5, são apresentadas as principais substâncias perigosas encontradas nos resíduos eletro eletrônicos, cujos teores variam muito em função das aplicações a que se destinam os produtos.

2.5 Caracterização das placas de circuito impresso

As placas de circuito impresso são parte integrante da quase totalidade dos equipamentos eletrônicos, só não sendo empregadas em situações muito especiais, de forma que sua presença é generalizada e é onde se concentram as características realmente eletrônicas dos produtos (LUDA, 2011). São as placas de circuito impresso que contém os componentes eletrônicos, cujos circuitos de interligação são projetados de acordo com cada aplicação, e cujos materiais dependem também da destinação dos circuitos (ANDRADE, 2002).

Quadro 2.2 - Substâncias perigosas, uso, exposição e efeitos à saúde.

Substância	Uso e Exposição	Efeitos à saúde
Cádmio	Utilizado nos contatos das PCI's, pó fosforescente dos TRC's, chips, semicondutores e como estabilizante do PVC. A maior exposição ocorre nos locais de trabalho onde os produtos com cádmio são fabricados ou reciclados, principalmente por meio de inalação do ar contaminado (GUO <i>et al.</i> , 2009).	Carcinogênico para seres humanos. Danos aos pulmões, doenças renais e irritação no aparelho digestivo.
Chumbo	Utilizado nas soldas das PCI's, lâmpadas e no vidro dos TRC's. A disposição final de produtos contendo chumbo nos RSD pode contribuir para sua presença nos aterros sanitários. A exposição ao chumbo ocorre pela inalação da poeira nos locais de trabalho, como instalações de reciclagem, onde EEE são quebrados ou triturados (MJC, 2004; OECD, 2003).	Acumula-se no ambiente, produzindo efeitos tóxicos agudos em plantas e animais. Em seres humanos podem causar danos aos sistemas nervoso central e periférico e ao sistema endócrino.
Cristal líquido	São incorporados entre finas camadas de vidro e elementos de controle elétrico de visores. Cerca de 250 substâncias diferentes podem ser utilizadas na sua formulação. São comercializados mais de mil tipos. Um monitor de <i>notebook</i> pode conter cerca de 0,5g (TSYDENOVA e BENGTTSSON, 2011).	Os cristais líquidos são suspeitos de serem perigosos, mas estudos sobre a sua toxicidade são escassos (TSYDENOVA e BENGTTSSON, 2011).
Dioxinas e Furanos	São compostos produzidos na combustão incompleta de substâncias orgânicas e cloro, como o PVC. A exposição direta ocorre por meio das emissões na atmosfera, e de modo indireto por contaminação do solo, alimentos, água e outros. A utilização de plásticos com retardantes de chama obtidos na reciclagem de REEE tem o potencial de produzi-los (TERAUCHI <i>et al.</i> , 2009).	São persistentes e bioacumulativos no ambiente. Alteram o metabolismo dos hormônios por meio de modificação das enzimas. Causam reações biológicas e fisiológicas: atrofia do timo e supressão da produção de anticorpos.
Mercurio	Usado em termostatos, lâmpadas de descarga, barômetros, termômetros e baterias. A exposição ocorre por inalação do ar e ingestão de água ou alimento contaminado. As ocupações com maior potencial para a exposição ao mercúrio são nas fábricas de EEE e nas instalações de reciclagem (OECD, 2003).	A exposição a níveis elevados do mercúrio pode danificar o cérebro, os rins e o feto em formação. Os efeitos no cérebro podem resultar em irritabilidade, timidez, tremores, alterações na visão ou audição e problemas de memória.
PCB – Bifenilapolicloradas	Usadas como fluidos refrigerantes e isolantes em transformadores, capacitores e outros EEE. Acumulam-se no tecido gorduroso, fazendo com que a exposição ocorra por meio do consumo de peixe ou outros predadores no topo da cadeia alimentar e também outros alimentos (FRAZZOLI <i>et al.</i> , 2010).	Os efeitos na saúde incluem problemas de pele nos adultos e mudanças neurocomportamentais e imunológicas em crianças. Conhecidos por causarem câncer em animais.
Retardantes de chama bromados	Utilizados como aditivos em plásticos e espumas de produtos como monitores de computador, televisões, espuma, cabos e condutores para torná-los resistentes à chama. A exposição pode ocorrer em instalações onde os EEE são reciclados ou armazenados (MORF <i>et al.</i> , 2005).	São desreguladores endócrinos. Seus efeitos sobre os hormônios da tireóide estão demonstrados, entretanto efeitos sobre outros sistemas hormonais são desconhecidos.

Fonte: Rodrigues (2012)

O percentual em peso que a placa de circuito impresso representa para cada produto varia muito em função do tipo de equipamento, tecnologia empregada, ano de fabricação e outros fatores, representando uma fração menor, da ordem de 3 %, para aparelhos eletrodomésticos de maior porte (GUO *et al.*, 2004) e frações maiores, como 8 % do peso, para pequenos produtos (WILLIAMS *et al.*, 2007). Kasper (2011) em uma pesquisa compreendendo um lote de seis marcas e 42 modelos de telefones celulares dos mais variados anos de fabricação, encontrou o peso das placas de circuito impresso numa faixa compreendida entre 20 % e 40 % do peso total de cada aparelho.

Uma placa de circuito impresso é constituída por uma base isolante – substrato - sobre a qual é “impresso”, com uma fina camada de cobre, o circuito de ligação entre os componentes.

Dependendo do grau de complexidade do circuito são necessárias várias camadas de substrato isolante com trilhas condutoras para possibilitar as interconexões, de forma que os cruzamentos das trilhas de cobre se dêem em camadas diferentes e as ligações entre camadas sejam realizadas através de furos metalizados. Modernos *chips* LSI (larga escala de integração) de processamento de imagem chegam a apresentar 1.000 pinos de conexão elétrica, com um espaçamento entre conexões de 0,4 mm (YONEDA, 2013).

Na Figura 2.2 é mostrada uma típica placa de circuito impresso multicamadas, com as trilhas condutoras banhadas a ouro, e sem os componentes montados. Na Figura 2.3 se vê uma placa de circuito impresso, também multicamadas, com os componentes montados, sendo esta uma típica placa de circuito digital composta por muitos *chips* de elevada integração e um grande número de conectores para cabos multi-vias que se destinam à interligação da placa com outros dispositivos.

Há uma tendência de redução do número de conectores em razão da maior integração de funções numa mesma placa, e também do emprego de tecnologias *Wi-Fi*. O aumento da integração, que resulta em maior concentração de funções por *chip* resulta em um menor número de *chips* e menor número de trilhas de interligação. A menor área total de trilhas traz uma redução no peso de ouro presente nas placas, nos circuitos em que o seu emprego se faz necessário para proteção contra a oxidação e garantia de melhor condução elétrica. O mesmo acontece com a redução dos conectores, onde é de fundamental importância o contato metal-metal, sendo comum o emprego de camada superficial de ouro.

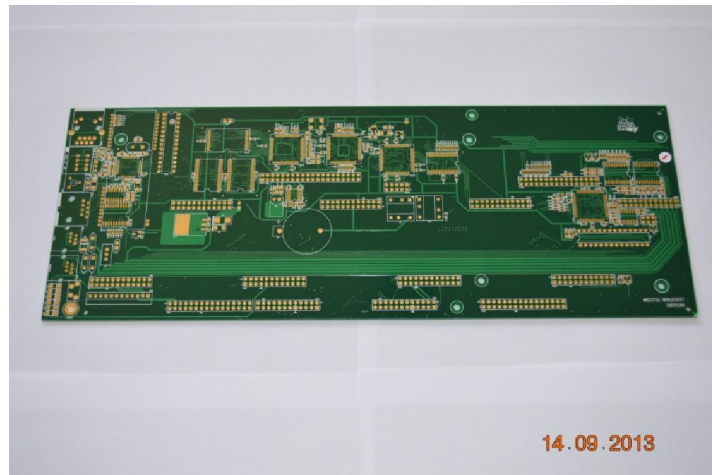


Figura 2.2- Placa de circuito impresso antes da montagem dos componentes eletrônicos

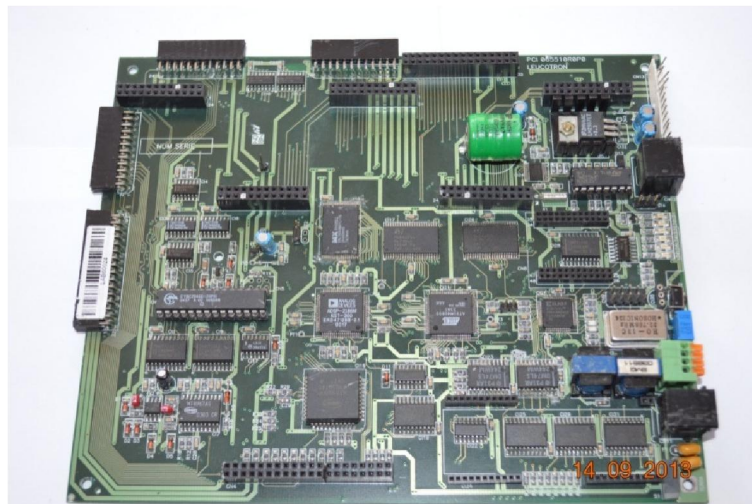


Figura 2.3- Placa de circuito impresso com os componentes eletrônicos montados

Por suportar mecanicamente os componentes eletrônicos e também conter os condutores de corrente elétrica que interligam os diversos componentes, os substratos das placas de circuito impresso precisam apresentar algumas características essenciais como:

- **Isolação elétrica:** o material deve apresentar baixa condutividade elétrica, evitando correntes de fuga entre as diversas trilhas, o que é cada vez mais significativo, considerando que à medida que se aumenta a densidade de componentes das placas, ocorrem o aumento do número de pontos de soldagem e o aumento do número de trilhas condutoras de interligação, crescendo a densidade de trilhas por unidade de área e a conseqüente redução do espaço de material isolante entre as trilhas;

- Absorção de umidade: o material deve apresentar baixa absorção de umidade de forma a garantir a isolamento elétrica e a não formação de sais na superfície do substrato;
- Rigidez mecânica e estabilidade dimensional: as placas devem apresentar boa resistência mecânica para suportar os diversos componentes que lhe são agregados, e boa estabilidade dimensional em função das variações de temperatura, ou seja, baixos coeficientes de expansão térmica nas três dimensões. Para se obter maiores velocidades de processamento dos equipamentos digitais, por exemplo, a densidade de componentes nas placas de circuito impresso destes equipamentos é cada vez maior, e a produção de calor resultante deste adensamento é igualmente mais elevada, resultando em maiores temperaturas de trabalho. Coeficientes de expansão térmica muito diferentes entre a placa de circuito impresso e os componentes, principalmente os *chips* processadores de alta densidade com grande número de pontos de solda e sujeitos à elevada dissipação de calor, podem provocar tensões e deformações mecânicas cíclicas que eventualmente resultam na geração de trincas.
- Inflamabilidade e resistência à propagação de chamas: todos os componentes elétricos ou eletrônicos apresentam certa resistência elétrica que é dependente da resistividade elétrica, uma característica intrínseca de cada material, e das dimensões físicas dos segmentos por onde circulam as correntes elétricas, o que resulta em permanente geração de calor por Efeito Joule. Este calor é dissipado para o meio ambiente através dos dissipadores e de processos de ventilação natural ou ventilação forçada, pelo emprego de ventoinhas. Eventualmente as placas ficam sujeitas a calor excessivo e concentrado, provocado pelo mau funcionamento de algum componente ou pela ocorrência de um curto-circuito, situações que podem resultar em correntes elétricas de grande intensidade com a conseqüente produção de elevadas temperaturas. Essas possibilidades resultam na exigência de que os substratos das placas de circuito impresso apresentem baixa inflamabilidade e alta resistência à propagação de chamas. Um resíduo é considerado inflamável quando for um líquido com ponto de fulgor inferior a 60 °C; não for líquido, mas ser capaz de produzir fogo por fricção, absorção de umidade ou por alterações químicas nas condições de temperatura e pressão de 25°C e 1atm; for um oxidante definido como substância que pode liberar oxigênio, ou for um gás comprimido inflamável (ABNT, 2004).

Com o propósito de aumentar a resistência à propagação de chamas são adicionados às substâncias constituintes dos substratos os retardantes de chama bromados (BFR – *Bromated Flame Retardants*), cujos três principais tipos são o Polibromobifenilo (PBB), o Éter

difenilpolibromado (PBDE) e o Tetrabromobisfenol-A (TBBPA), os quais podem liberar dioxinas e furanos a depender das temperaturas a que sejam submetidos, temperaturas estas sempre superiores às temperaturas normais de operação dos componentes.

As dioxinas são moléculas formadas por dois anéis benzênicos ligados por dois oxigênios. Estas moléculas possuem átomos de cloro que podem estar ligados em oito posições diferentes. Existem, no total, 75 dioxinas cloradas. Os furanos são moléculas semelhantes às dioxinas e se diferenciam por possuírem um oxigênio a menos. No todo existem 135 diferentes moléculas de furanos. Dos 210 tipos de dioxinas e furanos existentes, 17 são tóxicos ou carcinogênicos (ASSUNÇÃO *et al.* 1999).

Os retardantes de chama bromados foram muito utilizados devido ao seu baixo custo, alto desempenho e por causarem nenhuma ou pouca interferência nas características mecânicas das matrizes poliméricas (JUHASZ *et al.*, 2009). Por outro lado, seu emprego vem sendo controlado pelos países cujas legislações ambientais são mais restritivas. Na última década, por questões de segurança e por pressão dos ecologistas, tanto nos Estados Unidos quanto na Europa, está crescendo o emprego de aditivos retardantes de chama não halogenados, como as cargas inorgânicas, os derivados de fósforo e as melaninas, que não geram fumaça nem produzem gases tóxicos. Mas esta nova geração também apresenta algumas dificuldades de emprego, pois dependendo do material, para se atingir o nível UL 94V-0, que é o grau de resistência ao fogo definido pelo UL (*Underwrite Laboratories*) para este tipo de produto, é necessário o emprego de maiores quantidades do aditivo, resultando em alterações das propriedades mecânicas e morfológicas dos polímeros e das propriedades físicas e químicas, além de maiores custos de produção (NUNES, 2010).

Duan *et al.* (2011) estudaram diversos métodos para a desmontagem das placas de circuito impresso como etapa inicial dos processos de separação de componentes e recuperação de metais, concluindo que são necessárias temperaturas de 40 °C a 50 °C acima da temperatura de fusão da solda para uma efetiva remoção das peças, o que causa preocupação pela possibilidade de geração das dioxinas e furanos se esta temperatura não for bem regulada, como acontece nos processamentos não controlados, realizados a céu aberto, com o emprego de maçaricos ou fogareiros a gás.

As placas de maior utilização na indústria de equipamentos de comunicação e computadores são feitas com resina epoxy e fibra de vidro reforçada, com a designação comercial FR-4 (*Flame Retardant 4*), que são aplicadas nos setores de especificações mais rígidas; enquanto que equipamentos com menor grau de exigência como aparelhos de

televisão e eletrodomésticos utilizam placas com base em papel reforçado com resina fenólica, e designação comercial FR-2 (GOOSEY *et al*, 2003).

Quadro 2.3- Alguns tipos comuns de materiais de placas de circuito impresso e suas nomenclaturas segundo a *National Electric Manufacturers Association*– NEMA.

Nomenclatura	Reforço	Resina	Retardante de Chamas
FR-2	Papel de Algodão <i>CottonPaper</i>	Fenólica	Sim
FR-3	Papel de Algodão <i>CottonPaper</i>	Epoxy	Sim
FR-4	Tecido de fibra de vidro	Epoxy	Sim
CEM-1	Papel de Algodão <i>CottonPaper</i>	Epoxy	Sim
CEM-2	Papel de Algodão <i>CottonPaper</i>	Epoxy	Não
CEM-3	Tecido de fibra de vidro	Epoxy	Sim

Fonte: Sanapala (2008)

Há uma tendência cada vez maior do emprego das placas FR-4 em equipamentos de maior valor (SANAPALA, 2008). O laminado tipo FR-4 apresenta a composição mostrada no Quadro 2.4.

Quadro 2.4- Constituintes típicos do laminado tipo FR-4

Constituinte	Principal Função	Exemplo de material
Reforço	Provê rigidez mecânica e as propriedades elétricas	Tecido de fibra de vidro
Agente acoplador	Cola o vidro inorgânico à resina orgânica, e transfere os esforços através da matriz.	Organosilanes
Resina	Atua como um <i>binder</i> e agente de transferência de cargas.	Epoxy (DGEBA)
Agente de cura	Acentua as polimerizações linear e cruzada da resina.	Diciandiamida e Fenol Novolac
Retardante de chama	Reduz a inflamabilidade do material.	Halogenados (TBBPA) ou Não-Halogenados, como os compostos fósforosos.
<i>Fillers</i>	Reduzem a expansão térmica.	Silica
Aceleradores	Aumentam a taxa de reação, reduzem a temperatura de cura e controlam a densidade de link cruzado.	Imidazol e Organofosfina

Fonte: Sanapala (2008)

As placas de circuito impresso apresentam uma enorme diversidade de formatos, dimensões, variações de composição do material base e de componentes eletrônicos montados, uma vez que cada aplicação resulta em diferentes concepções de projeto (LUDA, 2011). Mas, apesar desta diversificação, as placas são montadas com os mesmos tipos de

componentes básicos: resistores, capacitores, indutores, diodos, transistores, circuitos integrados analógicos e digitais, *displays*, transformadores, conectores, etc., tendo cada um destes componentes uma composição diferente de materiais. Encontra-se o tântalo (Ta) nos capacitores. *Chips* e dispositivos semicondutores apresentam silício (Si), germânio (Ge), gálio (Ga), índio (In), titânio (Ti), arsênio (As), selênio (Se) e Telúrio (Te). As soldas podem conter estanho (Sn), chumbo (Pb), prata (Ag) e cádmio (Cd). Conexões internas dos *chips* e transistores podem conter alumínio (Al) ou ouro (Au), (ZHANG *et al.*, 2004).

Parson (2006) levantou quatro diferentes caracterizações, realizadas para quatro diferentes tipos de placas de circuito impresso oriundas de equipamentos diversos, encontrando os resultados mostrados na Tabela 2.1, excluídos materiais em quantidades muito pequenas, não relevantes para o estudo a que se destinava.

Tabela 2.1 - Composição por peso (%) de materiais de placas de circuito impresso selecionadas.

Material	Placa 1-FR4 Menos cobre e CI's	Placa 2- FR-4 Mais cobre e CI's	Placa3- Fenólica Monitor de TV	Placa 4- FR-4 Mais cobre e CI's (soldas em chumbo)
	%	%	%	%
Cobre -Cu	7	27	36	27
Ferro -Fe	12	2	10,7	2
Fibra de vidro com <i>filler</i> de SiO ₂	23,7	15	13	15
Plásticos	23	5	7	5
Ferrite	5	0	3	0
Epóxi	7	8	0	8
Fenólico	0	0	6	0
Ouro -Au	0,03	0,1	0	0,1
Bismuto -Bi	0,005	0,05	ND	3,45
Cromo -Cr	0,002	0,1	ND	0,1
Chumbo -Pb	0,3	3	0,2	0
Níquel -Ni	2,3	0,2	0,1	0,2
Prata -Ag	0,3	0,04	0	0,1
Estanho -Sn	0,3	3	0,2	2,5
Zinco -Zn	3	0,5	0	0,5
Alumínio -Al	7	1	22	1
Complexo equivalente da composição dos CI's	9	35	1	35

Fonte: Parson (2006)

Petter *et al.* (2012) realizaram estudo de lixiviantes alternativos para extração de metais de placas de circuito impresso utilizando apenas resíduos originários de telefones celulares descartados, encontrando – para a água-régia como agente lixiviante - as concentrações, de

274 [g/ton_{PCI}] para a prata, 890 [g/ton_{PCI}] para o ouro, 403.000 [g/ton_{PCI}] para o cobre, 21.548 [g/ton_{PCI}] para o estanho e 22.898 [g/ton_{PCI}] para o níquel.

Ogunniyi *et al.* (2009), investigaram a composição química de aproximadamente 250 kg de placas de circuito impresso oriundas do descarte por fim de vida útil de PC's, telefones celulares e *switchers* produzidas entre os anos de 1989 e 2002. A maioria das placas era de multicamadas com o máximo de quatro camadas, e algumas poucas de uma única camada e única face.

Foram retirados, antes do processo de caracterização, os capacitores, os *displays* de cristal líquido e as baterias. Analisando os extratos lixiviados obtidos por três diferentes agentes lixiviantes com o emprego de ICP-EOS (plasma de acoplamento indutivo - espectroscopia ótica) e ICP-MS (plasma por acoplamento indutivo - espectroscopia de massa), encontraram os resultados apresentados na Tabela 2.2, que demonstram o grau de influência dos agentes lixiviantes nos índices de concentração apresentados pelos extratos lixiviados para determinadas substâncias.

Tabela 2.2 - Valores de ensaio a partir das análises por ICP-OES e ICP-MS de resíduos moídos de placas de circuito impresso a partir de condições diferentes de digestão [mg/kg].

Elemento	Condição da digestão		
	Água Régia	HHM: HNO ₃ +HF +microondas	SPF: Na ₂ O ₂ (fusão) + HCl _(dissolução)
Au	220	124	
Ag	849	18,9	
Al	32.900	32.890	32.922
As	32,5	N.D.	
B	10.800	9.170	
Ba	7.590	8.120	8.140
Bi	319	237	
Ca	63.400	64.500	75.400
Cd	17	11,2	
Ce	72	48	
Co	92,2	90,6	
Cr	160,0	323	416
Cu	42.700	43.200	42.800
Fe	26.800	32.300	33.630
Hf	10,4	N.D.	
K	717	737	
La	91,5	19,9	
Li	40,3	39,7	
Mg	2.180	2.130	2.150
Mn	1.200	1.230	1.457
Mo	53,7	40,1	138
Na	2.120	2.050	
Ni	1.900	2.110	2.512
P	1.120	1.110	
Pb	23.100	22.300	23.530
Pd	158	137	
Pt	1,7	5,3	
S	555	2.750	
Sb	2.620	3.180	

Continuação Tabela 2.2

Elemento	Condição da digestão		
	Água Régia	HHM: HNO ₃ +HF +microondas	SPF: Na ₂ O ₂ (fusão) + HCl _(dissolução)
Se	N.D.	N.D.	
Si	4.070	11.600	139.300
Sn	29.100	29.800	
Sr	785	686	780
Te	N.D.	N.D.	
Th	6,0	2,4	
Ti	3.340	4.070	4.168
Tl	N.D.	N.D.	
U	1,9	1,9	
V	26,3	30,0	30
Y	9.65	5.80	
Zn	4.890	5.510	6.212
Zr	245	297	

Fonte: Ogunniyi *et al.* (2009) - N.D. – Não Detectado

Segundo Mustain (2004), o ouro, que desperta interesse especial para as análises de viabilidade econômica das unidades industriais de recuperação de metais devido ao seu elevado valor de mercado, tem seu emprego bastante disseminado na indústria eletrônica em razão da sua alta condutividade elétrica e grande imunidade à oxidação.

A aplicação do ouro é freqüente como deposição eletroquímica sobre o cobre, níquel ou ferro, nos contatos dos conectores elétricos e nas trilhas de cobre das placas de circuito impresso, com a finalidade de garantir bons contatos elétricos sem o risco da oxidação.

A maior utilização do ouro se dá por conta de outro atributo que é a alta ductilidade, que permite a produção de fios condutores de diâmetros muito pequenos, da ordem de 25 µm, e que são empregados para fazer as conexões internas de dispositivos semicondutores – chamadas *wirebonding* – que são as ligações elétricas entre os terminais da pastilha semicondutora e os terminais externos dos dispositivos, sejam componentes discretos, como os transistores, mostrado na Figura 2.4, sejam grupos de componentes como ocorre com os circuitos integrados, mostrado na Figura 2.5 e Figura 2.6 (MUSTAIN, 2004).

O emprego de ouro para *wirebonding* atingiu a marca de 150 toneladas no ano de 2004, quando era de aproximadamente 50 toneladas no ano de 1994, o que representa um crescimento expressivo. Mas novas tecnologias desenvolvidas em busca de menores custos, empregando outros materiais como o cobre e o alumínio, ou menores quantidades de ouro originadas diâmetros menores e diferentes formatos nos pontos de soldagem, indicavam uma tendência a uma redução nesta taxa de crescimento (ITABASHI, 2004). UNEP, (2009) menciona o consumo de 300 toneladas de ouro pela indústria eletro eletrônica no ano de 2005.

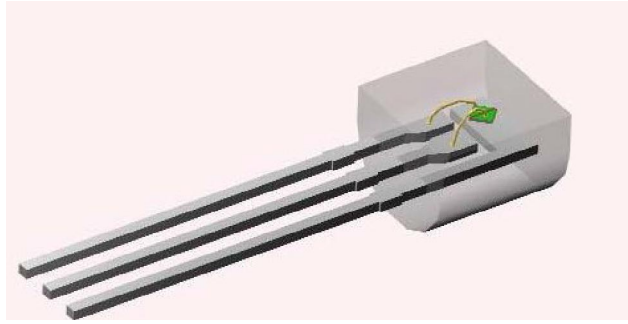


Figura 2.4 - Conexões *wirebonding* de um transistor bipolar em montagem PTH (*Pin Through Hole*)- Fonte: www.pcb007.com

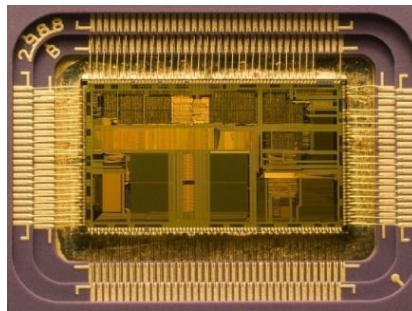


Figura 2.5 - Conexões *wirebonding* em um *chip* de alta densidade para montagem SMD (*Surface Mounting Device*) –Fonte: www.advotech.com

Demonstrando preocupação com o impacto ambiental resultante do descarte dos resíduos de equipamentos eletro eletrônicos, a Comunidade Européia implantou, no ano de 2006, normas restritivas ao emprego de algumas substâncias perigosas na fabricação de produtos, entre eles os eletro eletrônicos. Conhecidas como RoHS (*Restriction on certain hazardous substances*) e atualizadas em março de 2011, estas normas limitam o emprego de seis substâncias em porcentual do peso: chumbo (0,1%), mercúrio (0,1%), cádmio (0,01%), cromo hexavalente (0,1%), bifenilpolibromatado-PBB (0,1%) e éteres difenilpolibromatados – PBDE (0,1%) (COMUNIDADE EUROPÉIA, 2011). A redução do chumbo, por ser elemento constante das ligas de solda utilizadas anteriormente à edição das RoHS, demandou por muitas pesquisas e alterações em processos industriais, mas atualmente as novas ligas já permitem soldagem de alta qualidade, atendendo aos requisitos elétricos e de estabilidade mecânica, sem os aspectos ambientais nocivos anteriormente presentes. Também o mercúrio, muito utilizado em baterias e em lâmpadas fluorescentes utilizadas como “*back-light*” em telas de monitores de estado sólido, vem tendo a redução do seu emprego bastante acentuada.

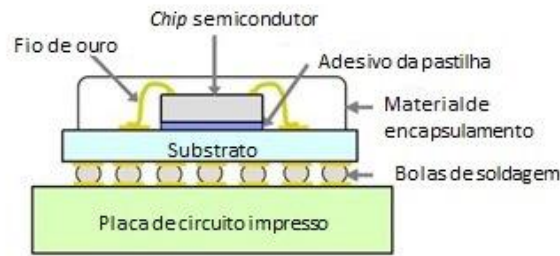


Figura 2.6 – Diagrama mostrando em corte a posição de fios de ouro fazendo a ligação elétrica entre o *chip* semicondutor e os terminais de solda (*solderball*). Fonte: www.tms.org

2.6 Processos de reciclagem

A reciclagem de placas de circuito impresso descartadas como parte de lixo eletrônico representa um significativo desafio tecnológico devido a serem muito diversificadas e complexas em termos dos tipos, tamanhos, formatos, materiais e componentes (HUANG *et al.*, 2009). Ao mesmo tempo em que oferecem risco ambiental por conta de alguns elementos e substâncias que as compõem, as placas de circuito impresso representam uma classe especial de recursos devido ao alto valor de mercado de muitos destes componentes (ZHOU *et al.*, 2007). A recuperação de metais preciosos é um dos maiores geradores de lucros para a indústria de reciclagem, destacando que aproximadamente um terço dos metais recuperados é o ouro (USGS, 2001).

Guo *et al.* (2008), fizeram estudo sobre o aproveitamento dos componentes não metálicos das placas de circuito impresso que restam após os processos de recuperação de metais. As frações não metálicas são normalmente compostas por resinas termofixas e fibra de vidro e chegam a representar 20 % em peso das placas de circuito impresso. As resinas termofixas não podem ser refundidas ou remoldadas por conta de suas estruturas de rede, e a incineração não é o melhor método para tratamento dos componentes não metálicos porque os *fillers* inorgânicos, como a fibra de vidro, reduzem muito a eficiência térmica. De modo geral estes componentes são destinados aos aterros sanitários, podendo causar poluição secundária e desperdício de materiais. Neste estudo os componentes não metálicos, após moagem e separação, receberam a adição de resinas como agente de cola e foram prensados em moldes a quente, produzindo placas de piso de excelentes características mecânicas.

Ainda há uma baixa conscientização do público em relação à necessidade de se recolher e reciclar o lixo eletrônico, e é fundamental que sejam estabelecidas rotinas de coleta e encaminhamento do lixo eletrônico para as usinas de reciclagem, de forma a manter o fluxo regular de material tal que permita viabilizar economicamente a implantação e operação

destas unidades industriais (JANG, 2010). Nos países ricos, como o Japão, operações de reciclagem de alta tecnologia funcionam bem, com o mínimo de impacto ambiental (ANDREOLA *et al.*, 2007).

Cuidado há que se ter com o planejamento, pois quaisquer benefícios ecológicos da reciclagem podem ser anulados se o lixo eletrônico tiver que ser transportado por longas distâncias desde os pontos de coleta até a planta de reciclagem, devido aos efeitos ambientais negativos da queima de combustíveis fósseis (BARBA-GUTIERREZ *et al.*, 2008).

Parson (2006), estudou, sob o ponto de vista ambiental, a reciclagem de placas de circuito impresso na Austrália, a partir de quatro diferentes tipos de placas, em oito diferentes cenários (para cada um dos quatro tipos de placa analisou as situações de serem remetidas para reciclagem em outros países ou simplesmente serem descartadas em aterros sanitários locais). Fez um comparativo do impacto ambiental em onze itens: carcinogênese, orgânicos respiratórios, inorgânicos respiratórios, mudança climática, radiação, camada de ozônio, ecotoxicidade, acidificação/eutroficação, uso do solo, minerais e combustíveis fósseis.

Os resultados mostraram que o único aspecto em que seria vantajoso o envio para reciclagem no exterior, com a recuperação de metais, era dos minerais, sendo que nos demais aspectos a disposição final em aterro sanitário local se mostraria ambientalmente mais vantajosa, devido principalmente ao elevado consumo de combustíveis fósseis empregados no transporte das placas para as várias etapas do processo.

A recuperação de metais a partir das placas de circuito impresso pode representar grande ganhos de energia quando comparada com a extração dos mesmos metais a partir dos minérios, chegando - a depender do tipo de sucata empregada - a índices como 95% para o alumínio, 85% para o cobre, 74% para o ferro, 65% para o chumbo e 60% para o zinco (CUI *et al.* 2003), havendo esta economia de energia também para outros materiais não metálicos presentes nas placas de circuito impresso, como 64 % para o papel e > 80% para os plásticos (PARSONS, 2006).

Os processos de recuperação de metais a partir das placas de circuito impresso atualmente empregados são a pirometalurgia, a hidrometalurgia e a biometalurgia (CUI *et al.*, 2008), e para todos eles a primeira etapa – também chamada de pré-tratamento - é a separação mecânica de componentes, que pode ser automatizada ou manual, neste segundo caso com o risco da participação do trabalho infantil, quando realizada nos países pobres (ROBINSON, 2009). Os componentes removidos das placas podem ser destinados ao reuso, no mercado de

usados, ou à recuperação de metais. A separação da solda dos componentes por queima a céu aberto também pode ocorrer, resultando na produção e exposição a contaminantes volatilizados. A separação mecânica acontece principalmente para os *chips*, com destaque para os processadores e memórias (circuitos integrados), baterias, capacitores eletrolíticos e algumas peças metálicas de maior porte como os dissipadores de calor (DELFINI *et al.*, 2011).

Na sequência, após a separação mecânica, as placas passam por um processo de cominuição, que é uma técnica mecânica de redução do tamanho das partículas. Os sólidos podem sofrer fragmentação através de vários tipos de esforços mecânicos, tais como atrito, corte, impacto, compressão, tração, flexão e torção (GERBASE, 2012). Nos processos industriais estão envolvidos quatro tipos de solicitação mecânica, que pode ser através de impacto, atrito (abrasão), compressão e corte (e/ou dilaceramento).

Os processos por compressão são utilizados para a ruptura grosseira de produtos duros, produzindo poucos finos. Os equipamentos que trabalham segundo este princípio possuem uma peça rolante muito pesada que esmaga e pulveriza o material. A substância é também submetida a atrito entre o rolo e as superfícies da câmara, surgindo tensões aplicadas entre as duas superfícies. Trabalham por compressão os britadores e trituradores. Os equipamentos que atuam por cisalhamento fragmentam a substância através de fricção entre duas superfícies, sendo especialmente utilizados nos casos de materiais macios, não abrasivos, fibrosos. Trabalham desta forma equipamentos que utilizam bolas, facas, discos e os moinhos coloidais. Nos equipamentos que trabalham por impacto a tensão é aplicada a uma única superfície. Nestes equipamentos existem martelos ou barras girando a altas velocidades que golpeiam o material, fazendo com que os fragmentos colidam uns com os outros e com as paredes do aparelho, podendo resultar em produtos grossos, médios ou finos. Muitas vezes as paredes possuem saliências que, atuando como obstáculos, contribuem para a fragmentação do material por propiciarem uma maior superfície de impacto contra substâncias que são nelas lançadas pela força centrífuga gerada pelo movimento do rotor. Trabalham por impacto os equipamentos com martelos, com barras e os micronizadores. Os equipamentos podem ser classificados de acordo com o tamanho das partículas de alimentação e do produto. Assim, os britadores se destinam à fragmentação de partículas de tamanho grande para médio; os trituradores às partículas de tamanhos médios e os moinhos são aplicados na redução de partículas médias a pós finos.

Em termos de tamanhos os sólidos podem ser classificados como:

- 1- Pós: Partículas de 0,1 mm até 0,5 mm
- 2- Sólidos granulares: Partículas de 0,5 a 10 mm
- 3- Blocos pequenos: Partículas de 1 a 5 cm
- 4- Blocos médios: Partículas de 5 a 15 cm.
- 5- Blocos grandes: Partículas > 15 cm.

Quando se processa placas de circuito impresso, o trabalho é normalmente realizado em duas etapas: fragmentação e moagem. Para a fragmentação utilizam-se equipamentos de facas rotativas, enquanto a moagem é usualmente feita em moinho de martelos, resultando após a moagem, em partículas na faixa dos sólidos granulares, geralmente menores que 5 mm ou 10 mm (KASPER, 2011).

Os trituradores de facas rotativas geralmente são construídos com dois eixos, havendo também configurações de três e quatro eixos. Nas suas extremidades os eixos são apoiados em robustos mancais de rolamentos de roletes com alta capacidade de carga, e os seus corpos são conformados no perfil quadrado ou hexagonal, de forma que possam transferir elevados torques para as facas rotativas. Estas facas são discos de aço de alta dureza e usinados de forma a apresentarem dentes de corte distribuídos ao longo da linha de circunferência, e cujos furos centrais de montagem apresentam o mesmo perfil dos eixos, como é mostrado na Figura 2.7. Há um cuidado especial com a montagem do conjunto, que se dá com folgas muito estreitas. A montagem dos discos de corte em cada eixo é feita com a inserção intercalada de anéis metálicos que cumprem a função de elementos separadores e posicionadores, e cujas espessuras são de apenas alguns centésimos de milímetro a maior do que as espessura dos discos de corte, sendo as diferenças entre as duas dimensões que garantem as mínimas folgas entre os discos. Os centros dos eixos são posicionados de tal forma na carcaça que, quando montados, os discos de corte ficam alternadamente em situação de interferência, com a periferia de cada disco a poucos décimos de milímetro da periferia de cada disco separador.



Figura 2.7 - Perfil típico de faca rotativa de um triturador, observando-se o formato hexagonal do furo. Fonte: RR Trituradores

A alimentação do material a ser triturado é feita por cima, em relação aos eixos e a descarga do material triturado ocorre por baixo. O corte dos materiais se dá basicamente por cisalhamento entre as partes que se apóiam nos discos de um dos eixos, enquanto dentes dos discos do outro eixo exercem a força, acontecendo também o dilaceramento, a depender de características do material. Os eixos são acionados por motores elétricos de elevada potência cujos eixos de saída alimentam redutores, normalmente planetários, com altas razões de redução, de maneira que os eixos girem a baixas rotações, mas com elevados torques. Os eixos, paralelos entre si, giram em sentido contrário uns dos outros. (Explicações obtidas em visita à fábrica RR Trituradores – Guarulhos – SP). A construção típica de um triturador de facas rotativas de dois eixos com redutores planetários é mostrada na Figura 2.8.



Figura 2.8 - Triturador de facas rotativas de dois eixos, com duplo acionamento através de moto-redutores planetários. Fonte: RR Trituradores.

Os moinhos de martelos são equipamentos de usos bastante diversificados e empregados em vários ramos da atividade industrial e do cotidiano dos habitantes do campo. Basicamente são constituídos por um rotor que gira no interior de uma câmara cuja parte superior contém o canal de entrada do material a moer, e na parte inferior se situa o alojamento da peneira em forma de arco de circunferência, como é mostrado na Figura 2.9. Operam por impacto dos martelos com o material e deste com as placas de britamento, fragmentando materiais frágeis, não abrasivos. As placas de britamento são obstáculos dispostos perifericamente na câmara de moagem, e que se opõem ao movimento circular que o material sob processo faz, por receber os impactos dos martelos em giro. Os martelos são articulados no rotor, o que permite o contínuo ajuste entre o martelo e o material em moagem, sem provocar o travamento do rotor.

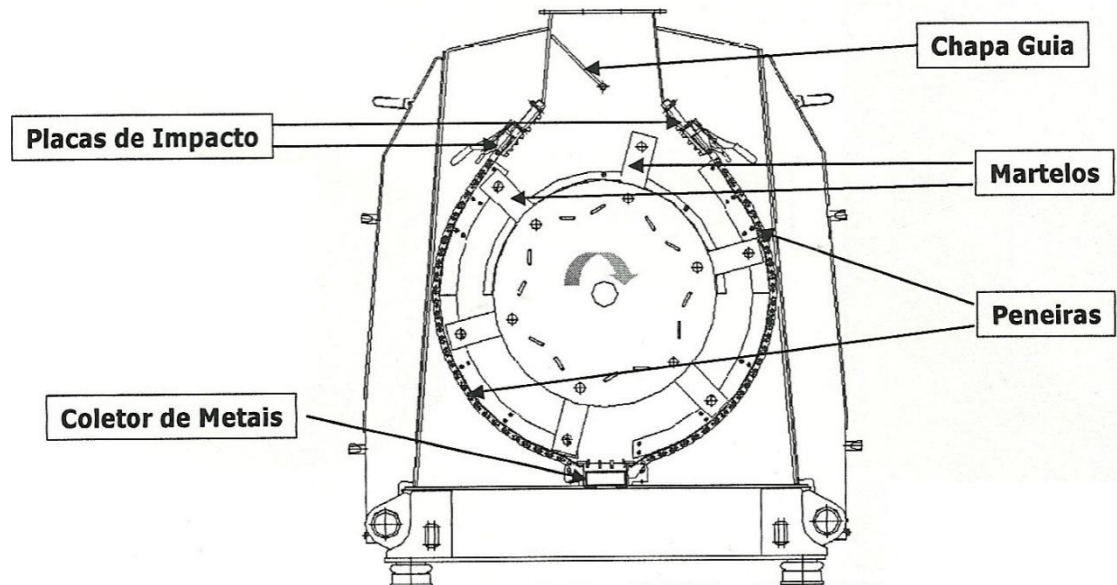


Figura 2.9- Câmara de moagem de um moinho de martelos. Fonte: MaquiServ – www.maquiserv.ind.br

Nos processos industriais os moinhos de martelo incorporam no eixo um rotor de aletas, que atua como soprador, criando um fluxo de ar de elevada vazão, e cuja entrada se dá pelo mesmo bocal de alimentação do material a ser moído e que é direcionado por uma tubulação de saída para um ciclone separador de sólidos, seguido por um filtro de mangas, que faz a retenção final do particulado mais fino, como mostrado na Figura 2.10. Desta forma existem três diferentes saídas de material moído: na saída da câmara de moagem, após a peneira, é retirada a fração mais pesada; na saída do ciclone são colhidas as partículas correspondentes à fração leve, e no depósito do filtro de mangas encontra-se o pó, parte da fração leve, que não foi retido na câmara do ciclone. Embora o princípio de operação seja o mesmo, cada material, em função das suas características como a natureza, tamanho, forma, dureza, etc., demanda por uma adequação de projeto ou de ajustes do moinho, envolvendo parâmetros como o volume da câmara, número, tamanho, formato e peso dos martelos, largura do rotor, tamanho e forma do ventilador, número, tamanho, forma e disposição dos obstáculos fixos, velocidade de rotação e potência de acionamento, entre outros, o que é feito num misto de dados e cálculos teóricos com ajustes empíricos em testes de funcionamento. Embora os martelos do moinho sejam articulados no rotor, o que em princípio evitaria travamentos, é preciso estabelecer, para cada projeto, as dimensões máximas de partes de elevada dureza ou de elevada tenacidade, de forma a que não ocorra o chamado “embuchamento” da câmara de moagem, com perda de eficiência do processo de moagem ou mesmo o travamento do rotor.



Figura 2.10 - Moinho de martelos com ciclone e filtro de mangas. Fonte: G.V. Moinhos Ltda – www.gvmoinhos.com.br

A divisão do processo de cominuição em várias etapas, com o objetivo de se obter o tamanho desejado para as partículas, proporciona um menor custo por otimizar o consumo de energia. A potência necessária para a operação de cada equipamento é determinada a partir do conhecimento do trabalho elementar necessário para fragmentar a unidade de massa do sólido com a variação de tamanho do material. Este trabalho elementar é determinado através de duas leis empíricas, a de Rittinger e a de Kick, e uma lei semi-teórica de emprego mais recente, a de Bond, sendo importante a otimização do processo de forma a minimizar o consumo de energia, que pode ser um item fundamental tanto nas análises de viabilidade econômica do processo, quanto na análise de sustentabilidade, onde o balanço energético é de enorme importância.

Estando na condição de particulado, estes resíduos seguem por processos de classificação com a finalidade de se conhecer a distribuição granulométrica das partículas, empregando-se diversificados processos de separação, dos quais se destacam como os mais utilizados (Cui *et al.* 2003):

Peneiração: que pode ser em tambor rotativo ou por vibração. Esta fase é necessária porque as características de formato e tamanho das partículas são diferentes para o maior conteúdo de metais ou dos plásticos e cerâmicas. Normalmente o sistema de tambor rotativo é mais empregado por ser menos susceptível do que as peneiras vibratórias ao processo de entupimento.

Separação por forma: As técnicas de separação por formato foram desenvolvidas principalmente para controle das propriedades das partículas nas indústrias do pó, e os métodos de separação foram classificados em quatro grupos por Fuuruchi *et al.* (1993). Os princípios em que se baseiam estes processos fazem uso das diferenças: (1) da velocidade da partícula em uma parede sólida rugosa; (2) do tempo que a partícula necessita para passar pela abertura de uma peneira; (3) da força coerciva da partícula para uma parede sólida e (4) da velocidade de afundamento da partícula em um líquido.

Separação magnética: Os separadores magnéticos, em particular os separadores de tambor de baixa intensidade, são largamente utilizados para a separação de materiais ferromagnéticos de materiais não ferrosos ou outros materiais não magnéticos. A introdução dos magnetos de terras-raras, com alta intensidade de campo, proporcionou grande desenvolvimento das técnicas de construção e operação de separadores magnéticos de alta intensidade a partir do ano de 1993.

Separação baseada na condutividade elétrica: A separação ocorre entre materiais de diferentes condutividades elétricas, e basicamente são três as diferentes técnicas de separação: (1) separação por *Eddy-Current*; (2) separação eletrostática por efeito Corona e (3) separação triboelétrica.

Separação por densidade: vários métodos diferentes são empregados para separar materiais pesados dos mais leves. A diferença de densidade dos componentes é a base da separação. A concentração gravimétrica separa materiais de diferentes gravidades específicas pelos seus movimentos relativos em resposta à ação da força da gravidade e de uma ou mais outras forças, sendo uma delas, a resistência ao movimento oferecida por um fluido, como a água ou o ar. O movimento de uma partícula em um fluido não depende apenas da sua densidade, mas também do seu tamanho e formato, sendo que as partículas maiores são mais afetadas que as de menor tamanho. Cui *et al.* (2003), analisaram diversos métodos de separação por densidade, mas apenas a separação gravimétrica em meio pesado, trabalhando com partes dos resíduos nas dimensões de 5 a 150 mm, se aplicava aos resíduos eletrônicos.

No final da cadeia de separação, em função das características físicas do particulado, obtêm-se diferentes volumes dos diferentes materiais ou grupos de materiais, o que possibilita o encaminhamento seguinte para o processo mais adequado para cada material, aumentando muito o rendimento energético, a velocidade dos processos e o grau de recuperação dos metais.

Quadro 2.5 - Processos de separação mecânica baseados nas características elétricas dos materiais.

Processo	Critério de separação	Princípios da separação	Objetivo da classificação	Faixa de tamanho trabalhável das partículas
Separação por EddyCurrent (Correntes parasitas)	Condutividade elétrica e densidade	Forças repulsivas atuando sobre partículas eletricamente condutivas devido à interação entre o campo magnético alternado e as correntes parasitas induzidas pelo campo magnético (Força de Lorenz)	Separação de metais não ferrosos/não metais	>5 mm
Separação eletrostática por efeito Corona	Condutividade elétrica	Carregamento Corona e diferentes descarregamentos resultam em cargas remanescentes diferenciadas, permitindo a ação de diferentes forças.	Separação metais/não metais	0.1 – 5 mm (10 mm para partículas laminares)
Separação Triboelétrica	Constante dielétrica	Tribo-carga com diferentes cargas (+ ou -) dos componentes causa diferentes direções da força	Separação de plásticos (não condutivos)	< 5 (10) mm

Fonte: Cui *et al.* (2003)

Pirometalurgia: É um processo metalúrgico que utiliza altas temperaturas, podendo produzir metais puros, ligas ou compostos intermediários. Requer elevado consumo de energia para atingir as temperaturas adequadas para cada etapa do processo. A energia necessária ao processo é geralmente fornecida por combustíveis fósseis, por reações exotérmicas que ocorrem nas diferentes etapas, ou por aquecimento elétrico (GUO *et al.*, 2009). O processo pirometalúrgico é constituído por várias etapas que vão desde a secagem da matéria prima até o refino do produto final. A etapa da transformação química a ser utilizada vai depender do material de partida. As etapas mais conhecidas são: calcinação (decomposição pelo calor na presença de oxigênio), ustulação (calcinação aplicada a sulfetos) e pirólise (decomposição pela ação do calor em um ambiente com pouco ou nenhum oxigênio) (SUM, 1991). Um dos maiores problemas dos processos pirometalúrgicos é a possibilidade de produção de compostos tóxicos como, por exemplo, as dioxinas, liberadas pela queima de polímeros clorados. As temperaturas de cada etapa do processo e os tempos de permanência em certas temperaturas devem ser cuidadosamente observadas, de forma a evitar estas formações tóxicas.

Hidrometalurgia: A hidrometalurgia consiste em uma série de ataques de soluções ácidas ou cáusticas com o objetivo de dissolver o material sólido. São empregados processos como a lixiviação com cianeto, com halogenato, com tiouréia ou com tiosulfato. Numa segunda etapa as soluções, já contendo os materiais dissolvidos, são submetidas a procedimentos de separação e purificação, como a precipitação de impurezas, a extração por solventes ou líquido-líquido, a adsorção e a troca iônica para isolar e concentrar os metais de interesse. Posteriormente as soluções são tratadas pelo processo eletrolítico, pela redução de produtos químicos ou de cristalização para a recuperação de metais (KASPER, 2011).

Os processamentos hidrometalúrgicos das sucatas eletrônicas são considerados vantajosos em relação aos processos pirometalúrgicos por apresentarem melhor proteção ambiental com relação aos riscos de poluição atmosférica, maior facilidade de separação dos principais componentes alvos e menores custos tanto pelo baixo consumo de energia quanto pela reciclagem dos reagentes químicos. Estudos para a recuperação de metais e a regeneração das soluções foram realizados por Lee *et al.* (2003) e Frías *et al.* (2004). Por outro lado, são vistos como pontos em desvantagem a necessidade de um pré-tratamento mecânico de redução dos volumes dos materiais, dificuldade em aceitar sucatas mais complexas, a necessidade do metal estar exposto para que ocorra o ataque químico, a geração de efluentes contendo metais base que são corrosivos, tóxicos, ou ambos e a geração de resíduos sólidos. Considerando as vantagens e desvantagens, a hidrometalurgia tem sido empregada com relativo sucesso, principalmente na recuperação do cobre (UNEP, 2009).

Biometalurgia: Muitos microrganismos, incluindo bactérias, algas e fungos, possuem a capacidade de remover metais pesados do meio ambiente. A capacidade de remoção, assim como os mecanismos de acumulação, podem variar amplamente de acordo com a espécie microbiana, ou até mesmo com a linhagem. Neste contexto, os microrganismos podem contribuir para a extração de metais contidos em matérias primas secundárias ou rejeitos de origem industrial, como o lixo eletrônico (BURGASTALLER, 1993 *apud* LEMOS *et al.*, 2008). Dentre as vantagens de extração de metais dos rejeitos industriais utilizando microrganismos, em comparação com processos convencionais, podem ser destacados o menor consumo de energia e menor efeito poluidor, e como desvantagem o tempo de processamento (LEMOS *et al.*, 2008). O desenvolvimento da biometalurgia tem se mostrado promissor na remediação das contaminações por metais pesados e o seu emprego na recuperação passa a ser mais estudado (UNEP, 2009).

2.7 Movimentos transfronteiriços do lixo eletrônico

Embora a presença nas placas de circuito impresso de componentes valiosos (materiais de base como Cu, Al e Fe e metais preciosos, como Pt, Au e Ag) sejam estimulantes para as atividades de reciclagem e recuperação de materiais, por representarem oportunidades com vantajosos retornos financeiros, quando analisadas sob o ponto de vista do valor do material recuperado (CUI *et al.*, 2008), o percentual de lixo eletrônico processado nos países ricos ainda é bastante pequeno. A maior parcela acaba sendo descartada em aterros sanitários ou é exportada para países pobres, o que se dá devido à falta de plantas industriais de reciclagem, aos altos custos trabalhistas e às fortes legislações ambientais (ROBINSON, 2009).

As tecnologias disponíveis para o adequado processamento, que recuperem os materiais componentes com o mínimo impacto ambiental, exigem alto investimento financeiro (LINDHQVIST, 2000 *apud* RODRIGUES, 2012). Schmidt (2006) estima que 80% do lixo eletrônico coletado nos países desenvolvidos são exportados para os países pobres.

Em 1992 a maioria dos países foi signatária de um tratado internacional, a Convenção de Basileia, cujos principais objetivos eram: minimizar a geração de resíduos perigosos (em quantidade e periculosidade); controlar e reduzir movimentos transfronteiriços de resíduos perigosos; dispor os resíduos o mais próximo possível da fonte geradora; proibir o transporte de resíduos perigosos para países sem capacitação técnica, administrativa e legal para tratar os resíduos de forma ambientalmente adequada, e prevenir e monitorar o tráfico ilegal de resíduos perigosos. Apesar dos contínuos esforços da Convenção de Basileia, cuja organização se mantém atuante no cenário internacional, e da proibição da exportação de resíduos perigosos, o fluxo de lixo eletrônico dos países ricos para os países pobres continua, seja por operações clandestinas, por artifícios legais ou por países que não ratificaram a convenção. Equipamentos eletrônicos usados, mas ainda em boas condições operacionais, são doados por pessoas e organizações humanitárias para países pobres, com o propósito de serem reutilizados, e com o efeito secundário de terem desta forma um aumento dos ciclos de vida, adiando os seus descartes finais (PUCKETT, 2005).

Por outro lado, organizações de má fé agindo de forma criminoso e utilizando-se de artifícios, remetem lixo eletrônico para países pobres disfarçado de doações, burlando a Convenção de Basileia (LADOU *et al.*, 2006).

LaDou (2006), em sua pesquisa sobre a indústria de placas de circuito impresso nos Estados Unidos, constatou que de 50% a 80% do lixo eletrônico americano são exportados

para outros países. Nos países pobres o processamento se dá de forma pouco cuidadosa, tanto com o meio ambiente quanto com a saúde das pessoas direta ou indiretamente envolvidas nos processos (UNEP, 2009).

Dentre os países que recebem os maiores fluxos de lixo eletrônico estão a China, o Paquistão, a Índia e Gana (HUANG *et al.*, 2009). A cidade de Guiyu, na província chinesa de Guangdong, com uma área de 52 km², tem uma população de 150.000 pessoas, todas de alguma forma ligadas aos trabalhos de recuperação de metais a partir do lixo eletrônico, originado principalmente dos Estados Unidos, Japão e Canadá (SCHNOOR, 2012).

Por ser o pólo de maior concentração mundial desta atividade, com processos primitivos de trabalho, Guiyu e sua região têm sido alvo de inúmeros estudos sobre os efeitos danosos tanto à saúde humana quanto ao meio ambiente, causados pela inadequação dos processos que são empregados nas atividades de recuperação de metais. (BI *et al.*, 2010; WONG *et al.*, 2006).

Nesta região é usual o aquecimento das placas de circuito impresso sobre grelhas de ferro para a remoção manual de componentes eletrônicos, visando o reaproveitamento no mercado de usados. Segue-se a queima a céu aberto com maçaricos a gás para a redução de volumes e recuperação de metais, principalmente o cobre. Também é comum a dissolução das placas de circuito impresso em soluções ácidas, após o que é provocada a precipitação dos metais preciosos. O restante da solução, sem interesse econômico, é descartado nas águas do rio que banha a cidade, sem qualquer cuidado com a neutralização. De modo geral, a utilização de ventiladores domésticos é a única precaução para proteger os trabalhadores das fumaças e gases liberados, e não se utilizam gorros, luvas ou máscaras (LEUNG *et al.*, 2008).

Foram verificadas contaminações ambientais aos sistemas aquáticos, ao ar e ao solo. Estudos realizados por Wang *et al.* (2006) e por Wang (2007) identificaram elevadas concentrações de Pb, Ag, Cr, Li, Mo, Sb e Se nas águas do rio Lianjiang, a jusante da cidade.

Da mesma forma, pesquisas realizadas por Luo *et al.* (2007) identificaram a bioacumulação de PBDE em sedimentos do ecossistema aquático próximo a uma localização de processamento de lixo eletrônico, com origem no processo de lixiviação em depósitos de resíduos. Muitos dos contaminantes originados no processamento das placas de circuito impresso são espalhados pelo ar e é onde se dá a maior exposição dos habitantes locais através da inalação, ingestão e absorção pela pele.

Li *et al.* (2007) coletaram amostras de ar nos arredores de Guiyu, encontrando dioxinas (PCDD) em concentrações de 65 a 2.765 pg/m³, os níveis atmosféricos mais elevados jamais reportados. Cai *et al.* (2006) recolheram amostras de terrenos de agricultura nas proximidades dos sites de reciclagem, encontrando elevadas concentrações de PBDE em solos de uma fazenda situada a 2 km de uma área de reciclagem de lixo eletrônico de Guiyu.

Schluep (2008) constatou que a maioria do lixo eletrônico importado por países do oeste da África vem da Europa, apesar da presença de eficientes unidades europeias de reciclagem. Os usuários locais já são, atualmente, as maiores fontes de lixo eletrônico da África, mas a importação ilegal de velhos computadores, televisores antigos e outros dispositivos eletrônicos usados, com origem na Europa, Estados Unidos e Ásia, ainda representam uma grande parcela (LUBICK, 2012).

Medições recentes realizadas em Accra – Gana mostraram a elevação dos níveis de contaminação do leite materno por aditivos antichamas à base de éter difenilpolibromatado, associada com a reciclagem informal de lixo eletrônico que é realizada localmente (KA *et al.*, 2011).

2.8 Legislação brasileira

Aprovada em 2 de Agosto de 2010, a Lei Federal 12.305 (BRASIL, 2010a) que foi regulamentada pelo Decreto Federal nº 7404 de 23 de Dezembro de 2010, instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que tem por objetivo reduzir a geração dos resíduos sólidos, o desperdício de materiais, a poluição e os danos ambientais.

Com relação ao lixo eletrônico, no Art. 3º, que trata das definições, encontra-se o item XVI que, ao definir os resíduos sólidos, torna explícita a inclusão do lixo eletrônico neste tipo de resíduo e, portanto, seu enquadramento na Lei. É importante entender também a definição de rejeitos, apresentada no item XVII, e que será alvo deste trabalho.

“XVI - resíduos sólidos: **material**, substância, **objeto** ou **bem** descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semi-sólido, bem como **gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu** lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível” (BRASIL, 2010a, grifo nosso).

Vê-se que ademais aos bens que constituem a enorme variedade de produtos eletrônicos existentes no mercado, com a mais ampla diversificação de finalidades, são também classificados como resíduos sólidos aqueles contidos na fração de lixo eletrônico oriunda de materiais dispensados ainda na indústria. Ali, numa fase pré-venda, ocorrem descartes resultantes de protótipos e de suas partes em razão de pesquisa e desenvolvimento de produtos e de falhas nos processos de fabricação de itens enquanto materiais, na forma de barras, tarugos e chapas de cobre, alumínio ou aço, plásticos e outros materiais, que podem ser resultantes de sobras de processamento, ou que não passem pelos controles de qualidade, ou que sejam danificados em processos de montagem ou de testes. Ocorre também o descarte de objetos, como os componentes eletrônicos variados que se utilizam nos circuitos eletro eletrônicos, itens estes que embora não tenham chegado a compor um bem de consumo, já têm o fim do seu ciclo de vida ocorrendo na própria indústria, na maioria das vezes por defasagem tecnológica.

“XVII - rejeitos: resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada” (BRASIL, 2010a).

Embora não esteja explícito, a expressão “processos tecnológicos disponíveis” pressupõe que sejam processos ambientalmente adequados.

Sobre os geradores e a responsabilidade pelo ciclo de vida, os itens IX e XVII definem todas as entidades envolvidas, sendo importante destacar as figuras do consumidor, dos responsáveis por serviços públicos relacionados e, naturalmente, por toda a cadeia produtiva e de comercialização:

“IX - geradores de resíduos sólidos: pessoas físicas ou jurídicas, de direito público ou privado, que geram resíduos sólidos por meio de suas atividades, nelas incluído o consumo;

XVII - responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos: conjunto de atribuições individualizadas e encadeadas dos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, dos consumidores e dos titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, para minimizar o volume de resíduos sólidos e rejeitos gerados, bem como para reduzir os impactos causados à saúde humana e à qualidade ambiental decorrentes do ciclo de vida dos produtos, nos termos desta Lei” (BRASIL, 2010a).

Os itens VII, VIII e XVIII definem respectivamente os termos destinação final, disposição final e reutilização, onde estão relacionados os vários processos possíveis de serem aplicados aos resíduos sólidos de modo geral, mas nem todos aplicáveis ao lixo eletrônico, devido às suas características de toxicidade:

“VII - destinação final ambientalmente adequada: destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do SISNAMA, do SNVS e do SUASA, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos;

VIII - disposição final ambientalmente adequada: distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos;

XVIII - reutilização: processo de aproveitamento dos resíduos sólidos sem sua transformação biológica, física ou físico-química, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes do SISNAMA e, se couber, do SNVS e do SUASA” (BRASIL, 2010a).

O item XII define a logística reversa e o Art. 33 atribui as responsabilidades pela sua execução:

“XII - logística reversa: instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada”(BRASIL, 2010a).

O Art. 33 define as entidades obrigadas a participarem do processo de logística reversa:

“São obrigados a estruturar e implementar sistemas de logística reversa, mediante retorno dos produtos após o uso pelo consumidor, de forma independente do serviço público de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de:

- I- agrotóxicos, seus resíduos e embalagens;

- II- pilhas e baterias;
- III- pneus;
- IV- óleos lubrificantes, seus resíduos e embalagens;
- V- lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista;
- VI- produtos eletro eletrônicos e seus componentes.

§8º Com exceção dos consumidores, todos os participantes dos sistemas de logística reversa manterão atualizadas e disponíveis ao órgão municipal competente e a outras autoridades informações completas das ações sob sua responsabilidade” (BRASIL, 2010).

Rodrigues (2012) levanta pontos interessantes sobre a implantação da Lei, que ainda dependem do estabelecimento de várias regras, prazos e responsabilidades, comentando a complexidade de gestão dos REEE e a experiência da União Européia. Destaca que as atribuições impostas aos municípios apresentam sérios obstáculos devido à dificuldade de identificação dos geradores, à falta de indicações de como se dará a remuneração dos serviços quando prestados pelo poder público ao se encarregar de atividades de responsabilidade dos demais agentes (produtores, distribuidores e comerciantes), e as dificuldades na fiscalização e controle destas atividades.

Entre outras ponderações importantes destaca-se ter observado uma forte resistência do setor industrial dos EEE ao estabelecimento de metas e prazos, utilizando-se de argumentos como: “não podem se responsabilizar pelos resíduos órfãos, oriundos de produtos ilegais e os resíduos históricos, e que estes devem ser arcados pelas administrações municipais” e “existe dificuldade em se estabelecer metas, pois os produtores não podem obrigar os consumidores a entregarem seus equipamentos obsoletos”. Completa observando que estes argumentos talvez não inviabilizem a realização de acordos setoriais, mas são utilizados para adiá-los o quanto for possível.

Leite (2009) analisa a complexidade do retorno dos produtos às origens, no processo de logística reversa previsto na lei, demonstrando que são múltiplos os fatores envolvidos, e que cada produto apresenta condições específicas para sua respectiva implementação, como a forma de coletar, transportar, armazenar, consolidar, processar industrialmente, selecionar e destinar os produtos ou materiais constituintes, e cujo correto equacionamento exige uma visão integrada de diversas áreas e aspectos multidisciplinares.

Coutinho (2012) mostra que decorridos dois anos da promulgação da Lei 12.305, e vencido o prazo para que os municípios apresentassem os planos locais para gestão de

resíduos sólidos, verificou-se a adesão de menos de 20 % dos municípios, prevendo um adiamento para 2014 das metas que determinam o fim dos lixões, a implantação da coleta seletiva e da reciclagem em todos os municípios brasileiros. O repasse de recursos depende da apresentação e aprovação dos planos municipais.

Dados levantados na pesquisa Perfil dos Municípios Brasileiros (IBGE, 2011), mostram que em apenas 32,3 % dos municípios havia alguma iniciativa sobre a coleta seletiva em atividade. Esta situação, que é a realidade nacional, reforça a oportunidade de soluções alternativas, mesmo que temporárias ou parciais, para um problema de dimensões e complexidade tão extensas.

Novaes (2013) alerta para a crescente tendência dos municípios brasileiros em adotar a implantação de incineradores, com riscos de emissão de dioxinas e furanos (elementos que podem ser cancerígenos) a depender das temperaturas de operação, e em prejuízo das atividades das cooperativas de catadores de materiais recicláveis.

Bernardes (2013), analisando a situação brasileira diante da Lei 12.305/2010, e considerando os diversos aspectos do comportamento do consumidor em relação aos conceitos de sustentabilidade, conclui:

“É possível imaginar uma eficácia relativa da Política Nacional dos Resíduos Sólidos, na medida em que encontra barreiras na própria estrutura do sistema capitalista, voltado para a produção, consumo e descartabilidade de produtos de maneira cada vez mais veloz e crescente. Em que pese os avanços, a solução legislativa parece padecer de problemas congênitos, a demonstrar que ainda são grandes os desafios para a construção de um consumo efetiva e ambientalmente sustentável, bem como de um tratamento e gestão de resíduos que, de fato, atinjam os objetivos propostos pela própria Lei 12.305/2010” (BERNARDES, 2013).

2.9 Construção em alvenaria

“Vinde! Façamos tijolos e cozamo-los ao fogo!’ O tijolo lhes serviu de pedra e o betume de argamassa” (Genesis 11:4) (CNBB, 2012). Assim é que a alvenaria se situa dentre os sistemas construtivos mais antigos empregados pela humanidade, sendo inúmeras as obras que, resistindo ao passar dos séculos, nos dão o testemunho da sua presença (ELSON, 2010).

As Pirâmides de Gisé, no Egito (2.000 a.C.), Figura 2.11 (esq.), o Coliseu em Roma (82 dC) Figura 2.11 (dir.), os aquedutos e grandes catedrais como a de Toledo (1226 a 1493) e a

Notre Dame, em Paris (1163) - Figura 2.12 (esq.), são alguns poucos exemplos da presença da alvenaria em diferentes épocas e regiões do planeta.

Na história recente a construção do edifício Monadnock Building em Chicago, Figura 2.12 (dir.), entre 1889 e 1891, com 16 andares e 65 metros de altura, foi um marco da arquitetura por demonstrar a aplicação deste método construtivo, denominado alvenaria estrutural. Suas paredes do térreo, com espessura de 1,80 m, se construídas com os elementos e métodos disponíveis atualmente reduziram a 30 cm (FRANCO, 2011).

A palavra alvenaria tem origem na língua árabe: o termo Al-Bannã, que significa o construtor, segundo o Dicionário Etimológico Nova Fronteira. Em língua portuguesa a palavra alvenaria tem o significado restrito como sendo “a arte ou obra do alvenel” que é o pedreiro em Portugal.



Figura 2.11- Pirâmides de Gizé (esq) -Fonte: www.reocities.com, e Coliseu Romano (dir)-
Fonte: www.historiazone.com

Machado, 2001, define alvenaria como uma obra produzida em canteiro, resultante da união de tijolos ou blocos, chamados de unidades de alvenaria, através de juntas de argamassa, e que formam um conjunto rígido e coeso, sendo suscetível de ser projetada para resistir a esforços de compressão única ou ainda a uma combinação de esforços, podendo conter armadura envolta em concreto ou argamassa no plano horizontal e/ou vertical.

Tendo como característica a conformação em obra e podendo assumir as mais diversas formas, resulta na aplicação da construção em alvenaria de inúmeros elementos construtivos, como paredes, muros de arrimo e de divisão, pilares, sapatas, pontes, coberturas, etc. Segundo

Nascimento Neto (1999), “*essas unidades devem agir como uma combinação íntegra para resistir aos esforços de compressão, bem como aos esforços cortantes*”.



Figura 2.12 - Catedral de Notre Dame - Paris (esq.) e Monadnock Building- Chicago (dir.) – Fontes: www.world-visits.blogspot.com; www.monadnockbuilding.com

Prudencio *et al.*, (2002) relatam que apesar de alguns avanços como o advento de blocos de concreto criados e patenteados na Inglaterra por Gibbs, em 1850, atribui-se a Paul Haller (Suiça) a responsabilidade pela revolução na área quando, em 1951, dimensionou e construiu na Basileia um edifício de 13 andares, com 41,4 metros de altura, dos quais 12 andares eram em alvenaria não armada com paredes internas resistentes de 15 cm de espessura e externas de 37,5 cm (FREITAS JR., 2012). No início do século XX, quando surge o concreto armado e ocorre uma grande evolução na siderurgia, as pesquisas sobre materiais e métodos construtivos se concentram nestes dois materiais, com o início de uma “nova arquitetura”, enquanto a alvenaria estrutural passa a ser considerada como “não técnica”. São exemplos desta fase construções como o *Empire State Building* com estrutura de aço - New York- 1929, e o Edifício Martineli com estrutura em concreto armado –São Paulo – 1922/29.

Em 1933, um grande terremoto em Long Beach – California, causa enorme destruição e resulta na proibição da alvenaria simples em todo o estado, proibição posteriormente difundida pelos demais códigos de construção dos EUA, com influência indireta nas construções no Brasil (FREITAS JR., 2012). A partir de 1950, surgiram na Europa e na América do Norte vários códigos de obras e normas contendo procedimentos de cálculo, resultando num crescimento expressivo da alvenaria estrutural em todo o mundo. Nesta mesma ocasião, nos Estados Unidos, a produção de blocos vazados de concreto já superava a

de tijolos cerâmicos, impulsionada pelo desenvolvimento das máquinas automáticas de prensagem e vibração concebidas por Jesse Bresser em 1904.

O início da utilização dos blocos de concreto no Estado de São Paulo ocorreu quando se construíram os primeiros prédios com quatro pavimentos em alvenaria estrutural, no Conjunto Habitacional “Central Parque da Lapa”. Em 1968 foi fundada a Reago, primeira indústria de blocos de concreto, e em 1972 construíram-se quatro edifícios com doze pavimentos neste mesmo conjunto, o que se constituiu num marco nacional de utilização desta técnica. Araújo (1995) destaca a estimativa que tenham sido construídos no Brasil, entre 1964 e 1976, mais de dois milhões de unidades habitacionais em alvenaria estrutural, mas com resultados que deixaram a desejar quanto à qualidade e durabilidade, o que resultou num esforço de pesquisas em busca de respostas às dúvidas com relação a este tipo de construção.

Em dezembro de 1977, num trabalho conjunto de profissionais do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), das indústrias produtoras de blocos de concreto, do Comitê Brasileiro de Construção Civil e da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), foi oficializada uma Comissão de Estudos para desenvolver as normas nacionais de alvenaria estrutural (SANCHEZ, 2002 *apud* Espinheira *et al.* 2010). Na década de 80 a alvenaria estrutural atingiu seu apogeu, quando diversas construtoras e produtoras de blocos investiram nesta tecnologia para torná-la mais vantajosa. O primeiro trabalho expressivo, realizado pelo IPT em conjunto com a empresa Cerâmica Selecta, foi conduzido pelo Engenheiro Gomes, e a seguir o Professor Sabattini realizou pesquisas para a empresa Cerâmica Tebas e posteriormente para a construtora Encol para o desenvolvimento de um sistema construtivo que envolvia desde a produção dos blocos de concreto até a manutenção dos edifícios, constituindo-se no maior trabalho de pesquisa científica de sistemas construtivos realizadas no Brasil até então (PRUDÊNCIO *et al.*, 2002). Ao mesmo tempo ocorria no Brasil uma transformação gradativa da sua base econômica rural para urbana (IBGE, 2000), intensificando a construção verticalizada de moradias de diferentes classes sociais, desde as residências de baixa renda até os condomínios de luxo, estabelecendo um ambiente de competitividade no setor da construção civil, que teve que rever as tecnologias e insumos empregados e as estratégias de sobrevivência no mercado. E neste contexto ocorreu a intensificação da construção em alvenaria estrutural com blocos de concreto, que representou uma resposta rápida e econômica às demandas habitacionais, com menores custos de produção e aquisição (ESPINHEIRA *et al.*, 2010), resultando na implantação de um grande número de fábricas de blocos de concreto.

2.10 Blocos de concreto de vedação

São diversas as definições para os blocos vazados de concreto, adotadas em vários países, que podem ser classificados como elementos estruturais ou elementos de vedação. Por serem elementos construtivos utilizados regularmente pela indústria da construção civil no Brasil, os blocos de concreto têm suas características principais normatizadas pela ABNT através da NBR 6136 (2007), que descreve o bloco vazado de concreto como sendo o componente de alvenaria cuja área líquida é igual ou inferior a 75% da área bruta, e quando esta condição não se verifica, o bloco é classificado como sendo maciço. A norma inglesa BS 6073 (1981), define o bloco vazado como um elemento de alvenaria que exceda as dimensões máximas dos tijolos em qualquer das dimensões, tendo como limite para a altura, o valor igual a seis vezes a largura, e o volume das cavidades que atravessam o bloco deve ser inferior à metade do volume total do bloco. A norma americana ASTM C 90 (1981) não se refere às dimensões e define o bloco de concreto como uma unidade constituída pela mistura de agregados, cimento e água, podendo ter ou não a adição de outros materiais. Izquierdo O. (2011) cita o trabalho de Medeiros e Sabbatini (1993) que consideraram que na sua maioria as normas definiam os blocos de concreto de maneira incompleta, e elaboraram a definição publicada em Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP como sendo *“a unidade de alvenaria constituída pela mistura homogênea, adequadamente proporcionada, de cimento Portland, agregados miúdo e graúdo, conformada através de vibrações e prensagem, possuindo dimensões superiores a 250 x 120 x 55 mm (comprimento x largura x altura)”*.

A utilização de blocos de concreto como elemento na construção em alvenaria se deu logo após o surgimento do cimento Portland, quando teve início a produção de unidades grandes e maciças de concreto (SALVADOR FILHO, 2007). Na América do Norte já se usava a alvenaria, levada pelos europeus, e no início do século XX Jesse Besser iniciou a produção de máquinas semi-automáticas destinadas à fabricação de blocos de concreto, sendo considerado o principal responsável pelo avanço deste componente no mercado norte-americano (IZQUIERDO I., 2011). No Brasil, a primeira utilização de blocos de concreto para a construção em alvenaria se deu por volta de 1940 com a construção de 2.400 residências do conjunto habitacional do Realengo na cidade do Rio de Janeiro.

As máquinas destinadas à fabricação dos blocos de concreto são chamadas de vibroprensas, tendo como principal característica a de transmitir uma vibração mecânica intensa ao concreto, simultaneamente à sua prensagem no interior da forma. Esta vibração tem a sua intensidade e duração controláveis, permitindo a adequação a cada produto.

A NBR 6136 (2007) classifica os blocos de concreto, quanto ao uso, em quatro classes, sendo:

- Classe A: Com função estrutural, para uso em elementos de alvenaria acima ou abaixo do nível do solo;
- Classe B: Com função estrutural, para uso em elementos de alvenaria acima do nível do solo;
- Classe C: Com função estrutural, para uso em elementos de alvenaria acima do nível do solo;
- Classe D: Sem função estrutural, para uso em elementos de alvenaria acima do nível do solo.

Os blocos utilizados como elementos de vedação, sem função estrutural, e que são o alvo deste trabalho, são classificados na Classe D.

Também as características de resistência à compressão, absorção de água e retração são normatizadas como mostrado na Tabela 2.3 onde, para a resistência à compressão, é adotada a resistência característica, que é uma medida estatística que procura assegurar que 95 % dos blocos de um lote estejam iguais ou acima ao valor mínimo estabelecido.

Tabela 2.3 - Requisitos para resistência característica à compressão, absorção de água e retração linear por secagem para os blocos vazados.

Classe	Resistência característica f_{bk} (MPa)	Absorção média em %		Retração (*) (%)
		Agregado normal	Agregado leve	
A	$\geq 6,0$	$\leq 10,0$	$\leq 13,0$ % (média) $\leq 16,0$ (individual)	$\leq 0,065$ %
B	$\geq 4,0$			
C	$\geq 3,0$			
D	$\geq 2,0$			
• (*) Facultativo				

Fonte: NBR 6136 (ABNT, 2007)

A absorção de água está limitada em 10 % para todos os tipos de bloco de concreto, e o teor de umidade é limitado de acordo com as condições do local de utilização, uma vez que a umidade provoca, nos blocos de concreto, o mesmo comportamento do concreto tradicional, ou seja, há uma expansão quando absorve umidade e uma retração quando perde. Esta movimentação do bloco quando inserido na parede pode provocar o aparecimento de fissuras e, conseqüentemente, a redução da sua vida útil (IZQUIERDO O., 2011). A Tabela 2.4

apresenta os valores de umidade como previstos pela norma NBR 6136 (2007), considerando as características de diferentes locais de instalação dos blocos.

Tabela 2.4 - Retração linear dos blocos em função do teor de umidade relativa do ar.

Retração Linear (%)	Umidade máxima em porcentagem do valor da absorção para diferentes condições de umidade relativa do ar no local de utilização		
	Local úmido *	Local de umidade relativa intermediária **	Local árido ***
$\leq 0,03$	45	40	35
$> 0,03$ a $\leq 0,045$	40	35	30
$> 0,045$ a $\leq 0,065$	35	30	25

Fonte: NBR 6136 (ABNT, 2007)

(*) Umidade relativa anual média superior a 75 %

(**) Umidade relativa anual média entre 50 % e 75 %

(***) Umidade relativa anual média inferior a 50 %

A retração por secagem, segundo Romagna (2000), é ocasionada pela diminuição do volume do bloco quando a água existente no seu interior evapora, mas sua definição é dada pela variação de um corpo-de-prova quando ocorre a secagem a partir de uma condição de saturação até se estabilizar numa massa e num comprimento de equilíbrio, sob condições padronizadas de secagem acelerada. Para blocos vazados de concreto a NBR 6136 (2007) estabelece a retração por secagem como menor ou igual a 0,065 %. Estando sujeitos à retração por secagem, os blocos de concreto não devem ser assentados úmidos, pois no processo de secagem a retração pode causar trincas. Mas quando utilizados em locais de evaporação intensa, os blocos devem ter sua superfície umedecida antes do assentamento para que a argamassa não perca sua fluidez (IZQUIERDO O., 2011).

Os blocos de concreto têm suas dimensões reais apresentadas na Tabela 2.5, onde as famílias de blocos estão classificadas por módulos e onde são definidos os espaçamentos construtivos de amarração e compensação. Os blocos adotados neste trabalho são os de módulo M-10, com o comprimento de 390 mm, como mostrado na Figura 2.13, e cujas demais dimensões estão destacadas na tabela. Sua escolha se deu por serem estas as dimensões mais empregadas na função de vedação, sendo estes blocos utilizados na construção das paredes e muros.

As dimensões das espessuras das paredes transversais e longitudinais, em função da classe do bloco de concreto, são dadas pela Tabela 2.6, sendo o mínimo de 15 mm para os blocos da Classe D, módulo M-10.

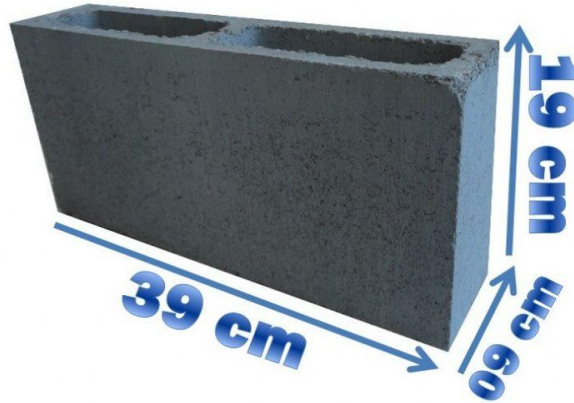


Figura 2.13- Bloco de cimento vazado para vedação - Módulo 10

Tabela 2.5 - Dimensionamento dos blocos de concreto.

Famílias de Blocos												
Designação	Nominal	20	15			12,5			10			7,5
	Módulo	M-20	M-15			M-12,5			M-10			M-7,5
	Amarração	½	½	½	½	½	⅓	½	½	⅓	½	
	Linha	20x40	15x40	15x30	12,5x40	12,5x25	12,5x37,5	10x40	10x30	10x30	7,5x30	
Largura (mm)		190	40	40	15	115	115	90	90	90	65	
Altura (mm)		190	90	90	90	190	190	190	190	190	190	
Comprimento (mm)	Inteiro	390	90	90	90	240	365	390	190	290	90	
	Meio	190	90	40	90	115	-	190	90	-	190	
	½	-	-	-	-	-	240	-	-	190	-	
	⅓	-	-	-	-	-	115	-	-	-	-	
	Amarração L	-	40	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Amarração T	-	40	40	-	365	365	-	290	290	-	
	Compens. A	90	0	-	0	-	-	90	-	-	90	
Compens. B	40	0	-	0	-	-	40	-	-	40		

Tolerâncias de $\pm 3,0$ mm para altura e comprimento, e $\pm 2,0$ mm para a largura

Fonte: NBR 6136 (ABNT, 2007)

Com relação aos aspectos de acabamento, a norma determina que os blocos devam ter arestas vivas e não apresentem trincas, fraturas ou outros defeitos que possam prejudicar o seu assentamento ou afetar a resistência e durabilidade da construção; os blocos destinados a receber revestimento devem ter uma superfície suficientemente áspera para garantir uma boa aderência, não sendo permitida qualquer pintura que oculte defeitos eventualmente existentes no bloco. Embora os blocos sem revestimento sejam empregados, de modo geral, apenas na construção de muros, é importante que sejam mantidas a boa aparência e regularidade superficial para que, nestes casos, a alvenaria tenha boa apresentação visual.

Tabela 2.6 - Dimensões mínimas das espessuras das paredes em função da classe.

Classe	Designação	Paredes Longitudinais ¹ mm	Paredes transversais	
			Paredes ¹ mm	Espessura equivalente ² mm/m
A	M-15	25	25	188
	M-20	32	25	188
B	M-15	25	25	188
	M-20	32	25	188
C	M-10	18	18	135
	M-12,5	18	18	135
	M-15	18	18	135
	M-20	18	18	135
D	M-7,5	15	15	113
	M-10	15	15	113
	M-12,5	15	15	113
	M-15	15	15	113
	M-20	15	15	113

1- Média das medidas das paredes tomadas no ponto mais estreito.
2- Soma das espessuras de todas as paredes transversais aos blocos (em milímetros), dividida pelo comprimento nominal dos blocos (em metros).

Fonte: NBR 6136 (ABNT, 2007)

Os materiais empregados na fabricação dos blocos de concreto são: aglomerante, agregados graúdos, agregados miúdos, aditivos eventuais e água. Pode-se ainda incluir aditivos plastificantes e redutores de água, assim como os corantes orgânicos, quando o objetivo seja o de produzir elementos coloridos com finalidades decorativas.

Aglomerante: É utilizado o cimento Portland e em geral todos os tipos podem ser empregados na produção dos blocos de concreto. Pode-se definir o cimento como o produto que se obtém pela pulverização do *clínquer* constituído essencialmente por silicatos de cálcio hidráulicos, a que não se fizeram adições subsequentes à calcinação, exceto a de água e/ou a de sulfato de cálcio bruto, além de outros materiais, que podem ser intercominuídos com o *clínquer*, em teor que não exceda a 1,0 %, à vontade do fabricante. Holanda, (2000) considera o cimento como um material com propriedades adesivas e coesivas quando misturado com a água, sendo capaz de unir e aglomerar fragmentos de minerais entre si, como areia e outros agregados, formando um todo compacto. Isto é possível pela reação química do cimento com a água, chamada de hidratação do cimento, que gera produtos com as propriedades de pega e endurecimento.

No Brasil são produzidos vários tipos de cimento Portland, diferindo entre si pelas composições. E, dentre eles, os mais empregados na produção de pré-moldados de concreto são os cimentos de alta resistência inicial (CPV ARI e CPV ARI RS), por possibilitarem a desforma rápida. O cimento de alta resistência inicial – ARI tem a particularidade, que o distingue dos demais, de atingir altas resistências nos primeiros dias de aplicação, e esta característica é devida a diferentes dosagens da argila e do calcário na produção do *clínquer*,

que aumenta a quantidade de C_3S na sua composição, e também pela moagem mais fina. Sua utilização na indústria de pré-moldados permite maior velocidade de produção, refletindo em menores custos (IZQUIERDO I., 2011).

Agregado: Entende-se por agregado o material granular, sem forma e volume definidos, de dimensões e propriedades adequadas para o uso em obras de engenharia (SALVADOR FILHO, 2007). Suas características são fundamentais para que se atinjam as propriedades desejadas para os blocos, pois podem interferir na aderência com a pasta de cimento, alterando a homogeneidade e a resistência do concreto.

De acordo com a NBR 7211 (1983) os agregados podem ser areia e brita, enquanto que a NBR 7173 (1982) estabelece que os agregados leves possam ser escória de alto forno, cinzas volantes, argila expandida ou outros que satisfaçam as especificações próprias a cada um destes materiais. Usualmente, na fabricação dos blocos de concreto, utilizam-se como agregados miúdos a areia natural/artificial ou o pó de pedra, e como agregado graúdo o pedrisco. As dificuldades apresentadas pela legislação ambiental para o licenciamento dos areais, e a crescente extinção das reservas naturais deste material, além do maior distanciamento dos areais que se afastam dos centros consumidores, refletindo em aumento do custo do frete, têm levado a uma tendência cada vez maior pelo emprego do pó-de-pedra, com reduzindo a participação porcentual da areia na composição do concreto. O pó-de-pedra, por ser um material pulverulento, apresenta algumas vantagens no preenchimento dos vazios do concreto. A correta escolha dos agregados é de grande importância para as características do bloco a ser produzido, devendo ser observados cuidados como a dureza, grau de compactação, e pequeno grau de impurezas.

Nos blocos vazados a NBR 6137 (2007) determina que o maior tamanho do agregado deva ser menor que a metade da menor espessura da parede do bloco.

Aditivos: Desde que não provoquem efeitos prejudiciais, que se possam comprovar por ensaios, é permitido o emprego de aditivos, conforme a NBR 7173 (1982), sendo os mais comuns os redutores de água, que resultam numa redução do consumo de cimento no concreto onde a relação água/cimento é constante. Alguns aditivos plastificantes e incorporadores de ar possibilitam, além da redução da proporção água/cimento, o aumento da coesão do concreto, diminuição da exsudação, melhor acabamento, e facilitam a limpeza das partes da máquina que entram em contato com o concreto, o que resulta em maior produtividade (HOLANDA, 2000).

2.11 Fábricas de blocos de concreto

As fábricas de blocos de concreto, no Brasil, são em sua maioria micro ou pequenas empresas, sendo uma grande parte de administração familiar. Tanto os custos de equipamentos quanto os custos do terreno e edificações não representam valores muito expressivos, quando se considera uma fábrica de pequeno porte, sendo, portanto, acessíveis a muitos empresários, mesmo os de menor capacidade de investimento, o que tem resultado na contínua implantação de novas fábricas (ABCP, 2010).

Basicamente uma fábrica de blocos de concreto é composta pelos seguintes recursos e equipamentos: depósitos de insumos (cimento, agregados e água); balança para pesagem de agregados e cimento; dispositivos de medição volumétrica de agregados (chamados padiolas) e vasilhas metálicas ou plásticas para medição do volume de água; máquina para mistura dos componentes e produção do concreto; prensa vibradora; moldes para as diversas famílias de blocos; *pallets* para deposição dos blocos imediatamente após a fabricação e dispositivos de transporte dos *pallets* ou dos blocos (normalmente carrinhos de mão, paleteiras ou empilhadeiras nas empresas de maior volume de produção). Deve contar com uma câmara úmida para o período inicial de cura e área suficiente para a armazenagem dos blocos durante o tempo restante da cura e o período de espera até a entrega aos clientes. Deve contar com áreas cobertas para o depósito de cimento, de parte dos agregados e para os equipamentos de produção, além da área administrativo-comercial e instalações de apoio aos funcionários como banheiros, vestiários e copa (Bedê M.A., 2002).

Os moldes, também denominados formas, são feitos em aço e constituídos por quatro partes: o castelo, que é a parte superior e responsável pela compactação do concreto; a matriz, que é a parte inferior, responsável pela estrutura do conjunto onde são moldados os blocos; as divisórias, que separam os blocos na matriz, e as canecas, responsáveis pelo formato dos furos dos blocos, Figura 2.14. Embora construídos em aço, por trabalhar todo o tempo com o concreto, que é um elemento abrasivo, é recomendável uma revisão geral dos moldes a cada 40.000 ciclos, pois é normal apresentarem desgaste nas partes internas, principalmente nas divisórias e canecas, que são os componentes que sofrem maior pressão de compactação, sendo obrigatório o acompanhamento dimensional através de medições periódicas de forma a controlar a manutenção da conformidade com as normas (Silva *et al.*, 2008). Suas estruturas são dimensionadas de forma a suportarem as elevadas pressões a que são submetidos no processo de prensagem.



Figura 2.14 - Molde para blocos de concreto. Fonte: Montbloc Formas e Moldes para Bloco e Piso de Concreto. Fonte: (www.montbloc.com.br)

A pesagem e a mistura dos materiais são etapas de enorme relevância para que se atinja e mantenha a qualidade e as propriedades físicas esperadas para os blocos em fabricação. Embora seja muito comum, deve-se evitar - sempre que possível - a medição dos componentes dos blocos por volume, pois pode ocorrer inchaço dos agregados devido à umidade, provocando erros nas proporções entre os componentes. As principais fontes de variação nesta etapa da fabricação foram assim relacionadas por Tango (1984 *apud* SALVADOR FILHO, 2007): (a) erros durante a determinação da água de amassamento que são provocados pela desconsideração da umidade dos agregados; (b) erros devido ao inchamento da areia, que provoca variações no volume quando o proporcionamento é feito em volume; e (c) erros causados por variações na quantidade de cimento, principalmente quando o proporcionamento é em relação ao saco de cimento. Assim, é preferível que a dosagem dos componentes seja feita pela massa do material, através de pesagem.

Uma vez dosados os componentes do concreto, a etapa a seguir é o processamento da mistura, que pode acontecer em misturadores de eixo vertical, de eixo horizontal ou basculantes (também denominados ‘betoneiras’). Cada equipamento tem suas características próprias, sendo que os misturadores de eixo vertical são os mais utilizados em indústrias de maior porte, que empregam sistemas automatizados de dosagem e de transferência de materiais.

A prensagem do concreto no molde é a etapa de maior importância na fabricação dos blocos de concreto e deve ser feita em equipamento capaz de transmitir vibração mecânica ao concreto ao mesmo tempo em que este é alimentado e prensado através das cavidades dos moldes, de forma a assegurar o correto preenchimento de todo o volume livre do molde, com o mínimo de vazios. Estes equipamentos são chamados de vibro-prensas e exercem as duas

funções. As propriedades dos componentes moldados são diretamente influenciadas pela vibração aplicada, sendo os seguintes os principais parâmetros que caracterizam a vibração, com influência no processo: frequência, direção, amplitude, velocidade, aceleração e tempo de aplicação, que é o tempo de adensamento do concreto no interior do molde (SALVADOR FILHO, 2007).

Quanto à direção da vibração, a depender da concepção de cada modelo da vibroprensa, pode ser unidirecional na direção vertical ou na direção horizontal; ou circular no plano vertical ou no plano horizontal.

A frequência de vibração foi determinada por Bresson (1981; *apud* SOUZA, 2001) como sendo em torno de 50 Hz como a ideal, e cujos estudos mostraram que a vibração no plano horizontal é mais eficiente que no plano vertical, atingindo maiores níveis de adensamento em menores tempos, como mostra a Figura 2.15.

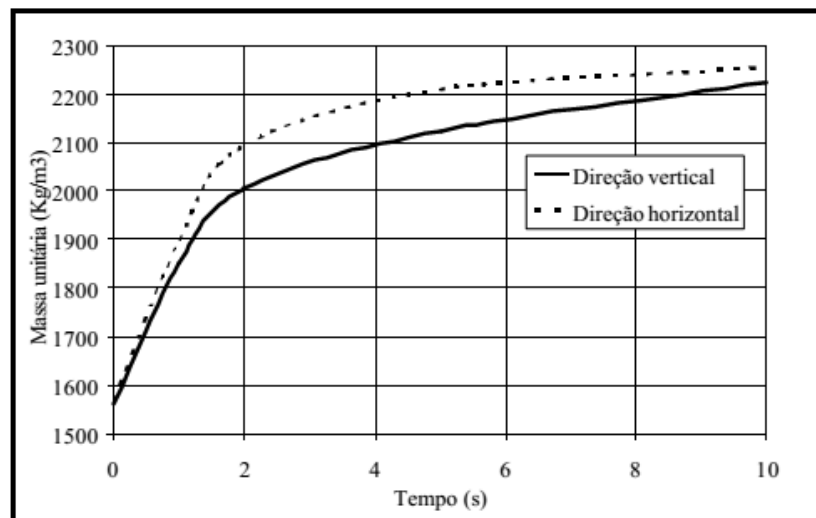


Figura 2.15 - Evolução do adensamento em função do tempo de aplicação e da direção de vibração. Fonte: BRESSON (1981) *apud* SOUZA (2001).

Com relação à amplitude, velocidade e aceleração das vibrações, pesquisas de Alexander (1977 *apud* BRESSON, 1981) mostraram que estes parâmetros exercem importante influência em todo o processo de fabricação, separando a vibração em três diferentes fases e analisando o comportamento do concreto quando submetido a este tipo de energia mecânica, como é mostrado no Quadro 2.6.

A amplitude da vibração é limitada pelo fabricante da vibroprensa em função das características construtivas do equipamento, da durabilidade e da precisão das dimensões do bloco, em especial com relação à altura (MEDEIROS, 1993).

Quadro 2.6- Comportamento do concreto submetido à vibração mecânica.

Fase	Descrição	Comportamento do concreto	Parâmetro essencial	Justificativa
Inicial	Há uma agitação dos grãos maiores do concreto	Mola	Amplitude	A força necessária para comprimir uma mola é proporcional à amplitude.
Intermediária	Há um escoamento viscoso	Amortecedor	Velocidade	A força necessária para comprimir um amortecedor é proporcional à velocidade.
Final	Há uma liquefação do concreto	Massa	Aceleração	Para colocar uma massa em movimento a força é proporcional à aceleração.

Fonte: Bresson (1981)

São quatro as modalidades de acionamento das vibro-prensas, como resumido no Quadro 2.7, e a escolha está, muitas das vezes, vinculada às disponibilidades de recursos financeiros para investimento.

Entretanto, devido à eficiência de processos, os recursos a mais aplicados em prensas dos tipos de acionamento hidráulico ou mecânico, que têm maiores valores de aquisição, podem ser recuperados em função dos menores tempos dos ciclos de fabricação e da redução do emprego de cimento.

Quadro 2.7 - Tipos de prensas utilizados para a fabricação de blocos de concreto.

Tipos	Características	Tempo dos Ciclos	Aplicação	Consumo de Cimento
Vibro-prensa manual	Rústica. Movida a força física. A operação manual limita a compactação dos blocos.	Alto	Blocos de vedação	Alto
Vibro-prensa pneumática	Movida a ar comprimido. Existem modelos com acionamento manual ou automático.	Médio	Blocos de vedação	Médio
Vibro-prensa hidráulica	Movida a óleo hidráulico. Existem modelos com acionamento manual ou automático.	Baixo	Blocos estruturais e de vedação	Baixo
Vibro-prensas mecânicas	Acionamento por sistema mecânico tipo “cam-driven”. Acionamento automático.	Muito baixo	Blocos estruturais e de vedação.	Baixo

Fonte: ABCP (2011)

É importante observar que a maior eficiência do processo de prensagem-vibração resulta na possibilidade de se aplicar traços com menor quantidade de cimento para se obter a mesma resistência à compressão, como é mostrado na Figura 2.16.

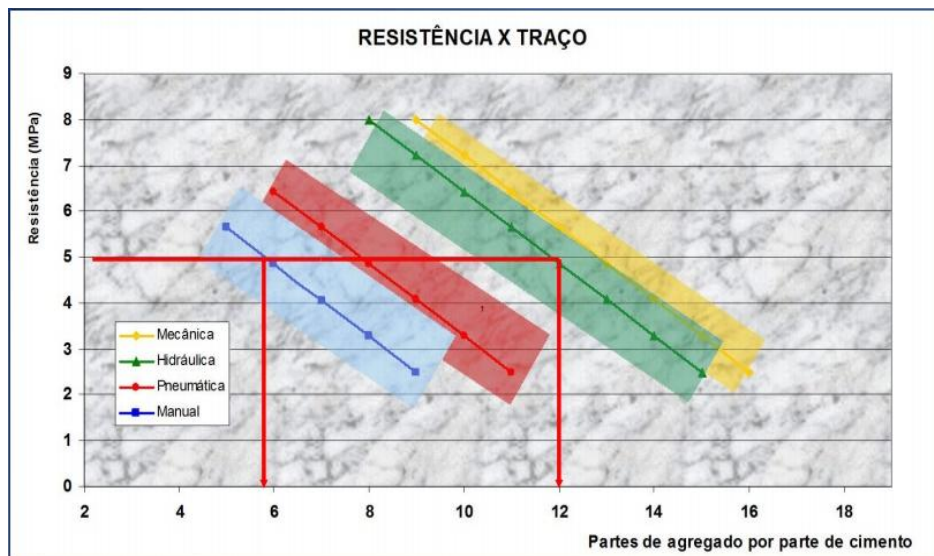


Figura 2.16 - Resistência à compressão dos blocos de concreto, em função dos diferentes tipos de acionamento das vibro-prensas. Fonte: ABCP (2011)

Segundo a ABCP (2011), é de relevância a qualidade de acabamento do piso da fábrica, que deve apresentar superfície suficientemente lisa para que o transporte dos blocos desde a saída da vibro-prensa até a posição de início da cura, e que normalmente é feito com carrinhos de mão, aconteça de forma suave, com poucos impactos, evitando a formação de trincas ou fraturas nos blocos, num momento em que sua resistência mecânica ainda é muito baixa.

2.12 Encapsulamento em matriz cimentícia

Problemas frequentes de contaminação do solo causados por vazamentos e derrames de petróleo e seus derivados durante a exploração, o refino, transporte e estocagem levaram à pesquisa e desenvolvimento de métodos capazes de minorar o impacto ambiental, geralmente medido pela contaminação do solo e do lençol freático. Da mesma forma, resíduos urbanos e industriais como os originários, entre outros, das indústrias curtumeira e metalúrgica, e da coleta de água de chuva de estrada (*rainfall-runoff*), geram grandes quantidades de efluentes capazes de contaminar o solo, contendo metais pesados em concentrações elevadas, como cromo, cádmio, chumbo, cobre e zinco.

São várias as técnicas já desenvolvidas e em desenvolvimento que têm sido empregadas para minorar os danos causados por estas contaminações, como a bio-

remediação, a separação eletro-cinética, a lavagem de solo (*Soil Flushing*) e a extração de vapor do solo.

Encontra-se também bastante difundido o emprego da técnica denominada encapsulamento de contaminantes, utilizada na remediação de solos contaminados por hidrocarbonetos e metais pesados (KNOP A., 2003). Esta técnica é também conhecida por estabilização/solidificação (E/S), e foi inicialmente utilizada para tratar resíduos atômicos nos anos 1950, e depois largamente aplicada no início dos anos 1970.

Geralmente, a E/S pode ser dividida em processos inorgânicos (que levam agentes ligantes inorgânicos, como cimento e material pozolânico) e orgânicos (que levam agentes ligantes orgânicos, como polímeros termoplásticos e termofixantes). Alguns sistemas combinam agentes ligantes inorgânicos com orgânicos. Os ligantes orgânicos que têm sido testados ou usados para E/S incluem asfalto, polietileno, poliésteres, polibutadieno, epóxido e uréia (BRITO, 2007). Em documento de 1982 a Agência de Proteção Ambiental Americana (*Environmental Protection Agency - EPA*), apresentou definições sobre a estabilização/solidificação de contaminantes, ou ‘encapsulamento’, como uma técnica capaz de proporcionar a diminuição da capacidade de transferir ou lixiviar poluentes, ou de provocar perda de solubilidade por partes dos constituintes perigosos, através da adição de um agente cimentante, como cimento ou cal. A USEPA tem se referido a essa como “a melhor tecnologia disponível comprovada” regularizada para 57 tipos de resíduos nos Estados Unidos (SHI e SPENCE, 2004, p. 392 *apud* BRITO, 2007).

Chen *et al.* (2009) definem o encapsulamento como o processo de converter um lixo tóxico para uma forma mais estável física e quimicamente, que seja menos tóxica ou que tenha menor mobilidade, acrescentando que o objetivo da solidificação/estabilização é de atingir e manter as propriedades físicas desejadas e estabilizar quimicamente ou conter permanentemente os contaminantes.

Na E/S, os contaminantes são aprisionados numa matriz sólida. Neste caso, a retenção do contaminante é limitada pela diminuição da área de superfície exposta ao meio ambiente e/ou pelo isolamento dos contaminantes da influência do meio externo por partículas presentes no resíduo. Spence *et al.* (2005) informam que na E/S ocorrem reações químicas entre os contaminantes e aglomerantes e/ou retenção de natureza física. A alta resistência, a pequena permeabilidade e a relativamente alta durabilidade do cimento hidráulico faz dele um bom agente de contenção para esta técnica de gerenciamento de resíduos (Conner, 1990 *apud* Chen *et al.* 2009). A imobilização de resíduos no processo E/S pode envolver mecanismos

físicos, químicos, ou a combinação de ambos. A estabilização física (solidificação ou encapsulamento) muda a forma física, mas não necessariamente causa ligação química dos constituintes do resíduo. A estabilização química muda os estados químicos dos constituintes do resíduo, transformando-os em formas menos solúveis em água.

A solidificação é um processo particular de estabilização de resíduos perigosos – daí o termo ‘estabilização por solidificação’. Por este método busca-se o total envolvimento das partículas contaminantes e, desta forma, a contenção da sua mobilidade. O encapsulamento se dá por micro encapsulamento, por encapsulamento de partículas individuais e por macro encapsulamento, que é a aglomeração de partículas microencapsuladas (WILES, 1987). Para o USACE, Corpo de Engenheiros dos Estados Unidos, o termo solidificação se refere a uma técnica de encapsulamento de contaminantes num sólido monolítico de densa integridade estrutural, destacando ainda que o processo de solidificação não envolve necessariamente a interação química entre o contaminante e os reagentes.

Dois aspectos são importantes para o entendimento da E/S. O primeiro está relacionado ao critério de imobilização dos contaminantes. Fica evidenciado que os contaminantes são aprisionados ou retidos na forma de um precipitado na superfície da matriz e/ou são incorporados em seu interior. O segundo aspecto está relacionado ao critério de integridade/durabilidade dos materiais, principalmente quando se afirma que a matriz E/S aprisiona ou retém os contaminantes por meio de mecanismos físicos, sem ocorrerem necessariamente reações químicas, mas aprisionamento físico (BRITO, 2007).

Pinto (2005), estudando os extratos lixiviados de metais pesados contidos em resíduos para os quais aplicou a técnica de estabilização/solidificação em matriz de cimento, encontrou resultados favoráveis com a redução da concentração no lixiviado.

Na lixiviação e na solubilização, ocorre o contato entre a matriz sólida e o solvente, dando lugar a uma transferência de matéria, ou seja, transferência de contaminante para o meio externo (BRITO, 2007). Para os propósitos deste trabalho, a E/S busca limitar a lixiviação e a solubilidade dos metais pesados presentes nos resíduos eletrônicos, diminuindo a superfície de exposição dos contaminantes em caso de contato com um fluido lixiviante (MESQUITA, 2008). De um modo geral, os parâmetros que influenciam na liberação de poluentes para o meio ambiente são a dimensão, a superfície exposta e a permeabilidade da amostra sujeita à ação de lixiviantes, o período de armazenagem, a temperatura e a natureza do lixiviante, a quantidade máxima disponível de poluente contida no resíduo, as condições hidrológicas do cenário, parâmetros biológicos e, por fim, parâmetros químicos, como pH,

exposição da amostra à carbonatação, entre outros. Para os testes, o fluido lixiviante é obtido na preparação do ensaio de lixiviação, sendo denominado solução extratora pela NBR 10005 (ABNT, 2004).

No caso da diluição dos resíduos eletrônicos entre os componentes que constituem os blocos de concreto para vedação, além da proteção dada pelo processo de estabilização/solidificação, conta-se também com o efeito adicional da probabilidade do bloco vir a ser utilizado como elemento de paredes internas de construções, sem qualquer contato com líquidos lixiviantes ou, mesmo que em paredes externas ou muros, mas protegidos por camada de reboco e/ou tinta.

Assim, é esperado que os resíduos resultantes da moagem das placas de circuito impresso que normalmente contém frações de metais pesados, quando diluídos como agregados na fabricação de blocos de concreto, como é previsto neste trabalho, devido ao processo de encapsulamento por matriz cimentícia, passem a apresentar extratos lixiviados e solubilizados com menores graus de concentração que os graus de concentração apresentados quando testados em estado natural.

Tomando-se como base o conceito de desenvolvimento sustentável, as implicações do uso dos resíduos em matrizes cimentícias e as aplicações como materiais de construção civil demonstram ainda a necessidade do estabelecimento de critérios e parâmetros ambientais, principalmente quanto ao controle e a liberação de contaminantes. A compatibilidade ambiental do material produzido com o aproveitamento de resíduos tem sido avaliada através da lixiviação de metais pesados e de sais.

Para se avaliar a liberação dos poluentes podem ser definidos os cenários e mecanismos lixiviantes existentes; medidos os parâmetros intrínsecos de lixiviação; utilizados modelos usuais de liberação, com incorporação das medidas dos parâmetros previamente definidos a fim de estimar a liberação do fluxo em longo tempo e comparar a liberação estimada com os critérios de aceitação. Portanto, o entendimento dos mecanismos físicos e químicos envolvidos são do maior interesse na avaliação dos produtos resultantes, e têm sido alvos de constantes estudos.

3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Fluxograma

O Planejamento experimental segue o fluxograma mostrado na Figura 3.1.

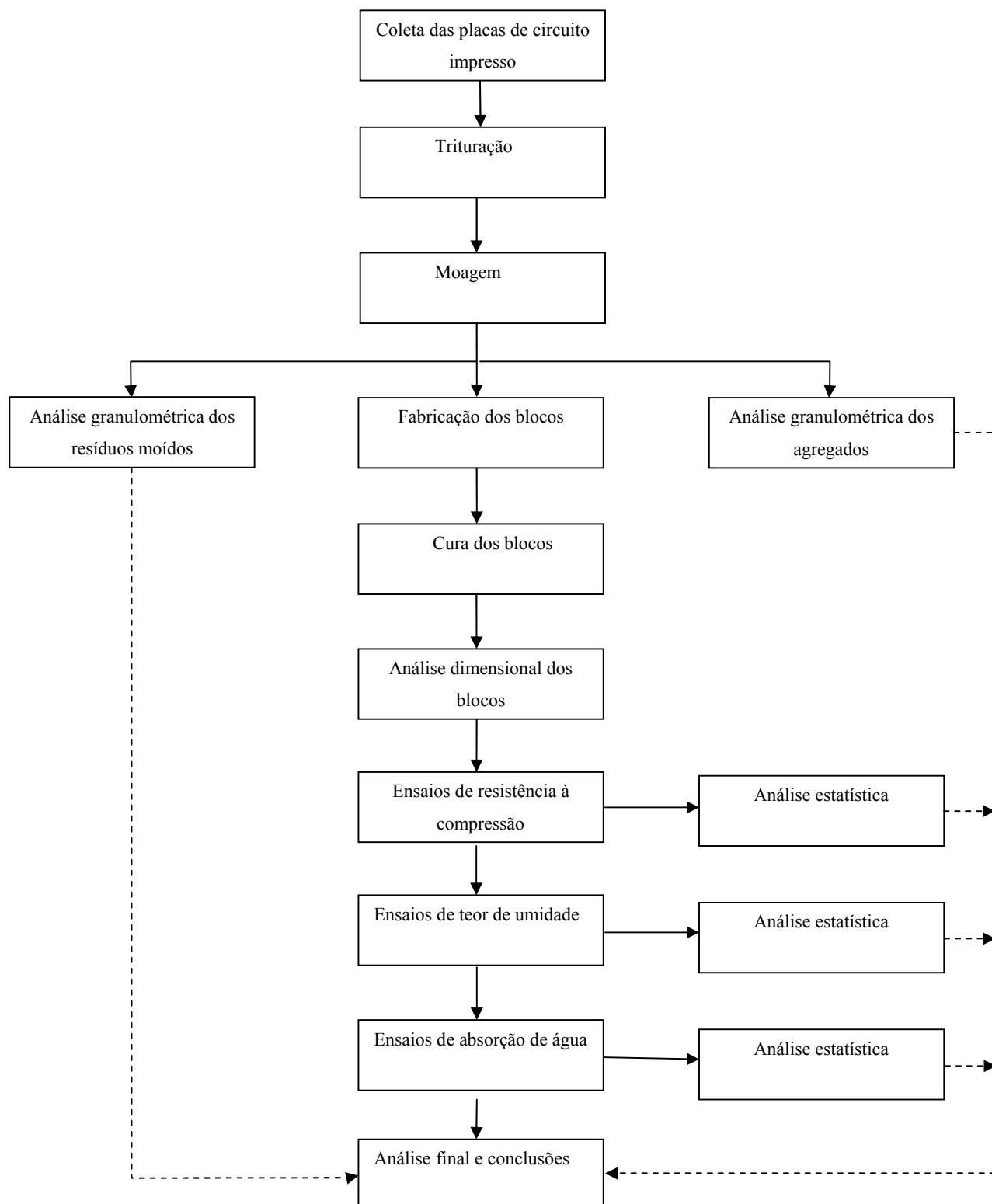


Figura 3.1- Fluxograma do planejamento experimental

3.2 Obtenção dos resíduos moídos de placas de circuito impresso

Parte das placas de circuito impresso utilizadas para os ensaios, totalizando 6,54 Kg e correspondendo a 26,5 % do material, foram doadas pela empresa Leucotron Equipamentos, de Santa Rita do Sapucaí/MG, e era constituída por sobras dos departamentos de desenvolvimento e de manutenção, sendo basicamente circuitos eletrônicos de vários tipos, aplicados em sistemas telefônicos PABx.

O restante, compreendendo 18,15 Kg e correspondendo a 73,5 % do material, foi adquirido da empresa de comércio de resíduos industriais, de Santa Rita do Sapucaí/MG, originados do descarte como lixo de equipamentos diversos e provenientes de variadas localidades, sendo a maior parte constituída por placas-mãe e placas de periféricos de computadores. Uma pequena parcela era formada por algumas placas de aparelhos de TV mais antigos, que utilizavam cinescópios (TRC).

As placas de circuito impresso dos equipamentos de PABx e as placas de circuito impresso de computador tinham seus substratos constituídos por compósitos à base de fibra de vidro, enquanto as placas de televisores antigos tinham o substrato à base de fenolite. Esta distinção entre um e outro tipo de substrato foi feita por simples análise visual e também reconhecida pelo forte odor característico no caso das placas de fenolite.

As placas de computador e de PABx eram do tipo multicamadas, o que foi identificado pela presença de muitos furos metalizados sem solda de componentes, indo desde uma face até a outra. A finalidade destes furos metalizados é de fazer a interconexão entre trilhas condutoras das diferentes camadas. As placas de televisor eram de uma única camada de substrato isolante, encontrando-se tanto placas de uma única face de trilhas metálicas, como também placas de duas faces.

Com relação aos tipos de montagem, as placas de PABx e placas de computadores utilizavam predominantemente componentes de montagem superficial (SMD) com pouquíssimos componentes de montagem PTH (*pin through-hole* – onde os componentes utilizam terminais metálicos que são inseridos nos furos em uma das faces da placa e soldados às trilhas condutoras na outra face), geralmente limitadas a alguns capacitores eletrolíticos de maior valor, algum indutor com núcleo de ferrite, ou os terminais de dispositivos semicondutores de maior potência, como mostrado na Figura 3.2 (esq.); enquanto que as placas de televisores antigos utilizavam apenas componentes de montagem *pin through-hole*,

como resistores, capacitores, transistores, diodos e transformadores, como mostrado na Figura 3.2 (dir.)

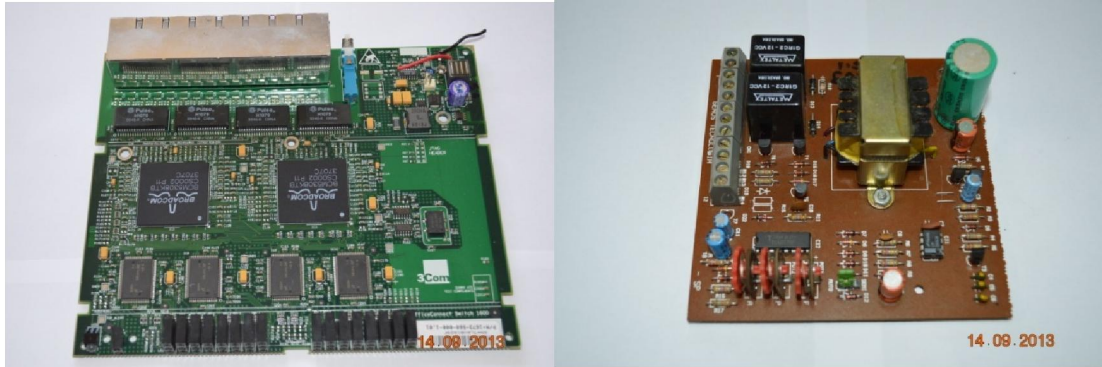


Figura 3.2 - Amostras das placas de circuito impresso em fibra de vidro (esq.) e fenolite (dir.)

Foi feito um levantamento por amostragem das características de peso e superfície das placas de circuito impresso em fibra de vidro, que geraram os dados que constam da Tabela 3.1, onde se podem observar as grandes variações da relação peso/área entre diferentes montagens de placas, determinadas pelos tipos e quantidades de componentes empregados, em razão das aplicações a que se destinavam. Em especial, as montagens que empregam transformadores ou núcleos de ferrite de maior tamanho ou em maiores quantidades, apresentam maior peso por superfície.

Tabela 3.1 - Amostragem de placas de fibra de vidro montadas e sem montar.

Amostra	Comprimento [cm]	Largura [cm]	Área [cm ²]	Peso [g]	Peso/área [g/cm ²]	Observações Material/aplicação
1	24,39	19,31	470,97	506,31	1,07	Fibra de vidro - <i>Motherboard</i>
2	19,61	16,04	314,54	207,05	0,66	Fibra de vidro - <i>Switcher</i>
3	20,40	17,06	348,02	296,23	0,85	Fibra de vidro- Circuito de controle
4	8,25	7,13	58,82	34,55	0,58	Fibra de vidro- Circuito de PABX
5	34,54	12,61	435,54	905,17	2,07	Fibra de vidro - Circuito de <i>no-break</i> com diversos transformadores, capacitores eletrolíticos e dissipadores
6	30,26	11,56	349,80	116,77	0,33	Fibra vidro multi-camadas sem componentes
7	32,93	29,42	968,80	338,30	0,35	Fibra vidro multi-camadas- sem componentes

A seguir as placas foram trituradas em equipamento triturador de facas rotativas da empresa SanLien, da cidade de São Paulo, reduzindo as dimensões para fragmentos com a média de 2,8cm x 1,3cm, como está mostrado na Figura 3.3.



Figura 3.3 - Placas após trituração

Após esta primeira fase, as partes já trituradas e de pequenas dimensões foram separadas manualmente com o objetivo de retirar os fragmentos que continham núcleos de ferrite ou de transformadores, e peças de ferro de maiores dimensões, como eixos, suportes de componentes, parafusos e porcas de maior porte, que poderiam causar problemas no processo de moagem, Figura 3.4. Eventualmente, o emprego de um triturador de facas de maior robustez e potência poderia reduzir o percentual destes fragmentos de maior dificuldade para a moagem, que neste processo representaram 2,7 % do peso inicial entregue ao triturador.



Figura 3.4 - Fragmentos separados após o processo de trituração por conterem partes metálicas em alumínio, ferro, ferrite e fios de cobre de maiores dimensões e/ou peso.

Uma vez separadas estas partes, o material restante foi encaminhado para um moinho de martelos, utilizado para pesquisa e desenvolvimento na empresa GV Moinhos, também da cidade de São Paulo. Este moinho de martelos conta com um soprador para deslocamento de particulado leve, que é encaminhado a um sistema de separação por ciclone e um filtro de mangas. A empresa GV Moinhos já havia desenvolvido anteriormente equipamento para moagem de placas de circuito impresso, que foi fornecido para a empresa SanLien, de forma que já dominava esta tecnologia. Neste desenvolvimento anterior, o moinho recebia o material pré-triturado em triturador de facas rotativas, em sequência semelhante à adotada neste experimento. Para a realização da moagem, o moinho de martelos foi previamente ajustado e um primeiro lote foi alimentado, resultando em particulado de granulometria maior, como mostrado na Figura 3.5. A seguir foram feitos ajustes com a substituição do tipo de martelo e da malha da peneira, resultando em particulado mais fino, como mostrado na Figura 3.6 e com os resultados de granulometria levantados no ensaio.

Não foram alteradas a rotação do rotor do moinho, nem a forma dos obstáculos da câmara de moagem, parâmetros que podem contribuir para a obtenção de granulometria mais fina e maior rendimento na moagem, em termos de Kg/hora. Tais ajustes demandariam por mais tempo e maiores custos, o que estava fora das limitações do presente trabalho.



Figura 3.5 - Resíduos de placas de circuito impresso após processo de moagem em moinho de martelos – Fração pesada - Primeiro ajuste – peneira grossa – malha $\Phi = 16$ mm.

Feitas as pesagens das frações leve (coletada no depósito de material do ciclone – mostrada na Figura 3.7) e fração pesada (coletada na saída da peneira da câmara de moagem), as duas frações foram novamente juntadas e misturadas, constituindo nos resíduos moídos de

placas de circuito impresso que foram levadas para a indústria Crabi, para a adição como agregados na fabricação das séries de blocos para testes.



Figura 3.6- Resíduos de placas de circuito impresso após processo de moagem em moinho de martelos – Fração pesada - Segundo ajuste – peneira fina - malha $\Phi = 9$ mm.



Figura 3.7 - Fração leve dos resíduos de placas de circuito impresso após moagem em moinho de martelos. Observa-se fragmentos de folhas aluminizadas, que são oriundas dos capacitores eletrolíticos e o material proveniente do substrato de fibra de vidro.

Amostras das frações leve e pesada foram encaminhadas para o Laboratório de Estruturas da UNIFEI, onde foi feito o levantamento das características de granulometria do material. Os trabalhos foram conduzidos na etapa inicial pela aluna de graduação em Engenharia Civil, Marina Bayeux Delvechio e concluídos pelo aluno de graduação em Engenharia Civil Marcos Vinicius Moraes, cujos trabalhos são transcritos parcialmente a seguir.

3.3 Fabricação dos Blocos

A fabricação dos blocos de cimento foi realizada pela empresa Crabi, de Varginha, e foi escolhido o bloco de vedação módulo M-10, com as dimensões de 39 cm x 19 cm x 9 cm.

Na sua composição, além do cimento, que age como aglomerante, a Indústria Crabi utiliza a areia, a brita, e dois tipos de pedriscos de granito que, pelas peneiras utilizadas para sua separação, recebem as classificações de agregados finos e agregados mistos. Foram fabricadas três séries, sendo: série A, sem adição de resíduos eletrônicos; série B, com a substituição de 1,5 % do peso dos agregados finos por resíduos eletrônicos moídos e série C, com a substituição de 2,0 % em peso dos agregados finos por resíduos eletrônicos moídos.

A dosagem dos componentes foi feita por pesagem automática na saída dos silos, que alimentam as esteiras transportadoras, as quais descarregam os componentes na moega do misturador. Da mesma forma, a dosagem do cimento e da água foi feita por pesagem. Utilizou-se cimento Portland tipo CP-V-ARI-PLUS U-Rápido, que é fornecido a granel, diretamente da usina fabricante para a indústria Crabi, sendo armazenado em silo vertical de aço. A areia utilizada foi do tipo fina com origem em rio da região do Sul de Minas, e os granulados empregados foram a brita, o pedrisco e o pó de pedra, os dois últimos nomeados agregados mistos e agregados finos, respectivamente. O preparo do concreto foi feito em misturador planetário de fabricação CIBI, modelo P-750, com capacidade de 1.200 Kg por batelada. A moldagem dos blocos foi realizada em molde de oito cavidades, prensado em prensa hidráulica automática, controlada por CLP, de fabricação Tprex, modelo Vibroprex VP-500 HO93, que utiliza mesa flutuante com sistema de vibração transversal, Figura 3.8.



Figura 3.8 - Prensa vibratória hidráulica para a fabricação dos blocos
Fonte: www.tpex.com.br

3.4 Ensaios de Laboratório

Os trabalhos de laboratório foram divididos em dois segmentos:

- a. Ensaios de resistência à compressão e dimensionais, realizados no laboratório das Indústrias Crabi, em Varginha/MG.
- b. Ensaios de peso, granulometria, massa específica, teor de umidade e absorção de água, realizados nos laboratórios de solos e estruturas da UNIFEI, campus Itajubá/MG.

3.4.1 Determinação da composição granulométrica dos resíduos de lixo eletrônico moídos

Com porções da fração leve e da fração pesada de amostras das placas de circuito impresso moídas e trituradas, foram realizados os ensaios de determinação granulométrica para esse agregado, segundo a norma NBR NM 248 (ABNT, 2009).

Para esse ensaio foram utilizados:

- uma balança KNWAGEN, modelo KN8800 DR, com resolução de 0,1% da massa da amostra e faixa nominal de 05 g a 8800 g;
- agitador mecânico A BRONZINOX
- conjunto de peneiras da série normal, com aberturas descritas pela Tabela 3.2.

Tabela 3.2- Série de Peneiras - abertura em mm de cada malha

Malha	Em mm
5/8	16
3/8	9,6
4	4,8
8	2,4
16	1,2
30	0,6
50	0,3
100	0,15

A estufa não foi utilizada nas análises porque o material já se encontrava seco. Primeiramente foi realizado o ensaio para a fração leve, composta principalmente pelos fragmentos de fibra de vidro e dos capacitores, em forma laminar.

Com as peneiras da série normal, devidamente limpas, realizou-se a sua pesagem e então se encaixou umas nas outras, de forma que a abertura das malhas fosse crescente da base ao topo do conjunto, e após a peneira de malha mais fina, colocou-se o fundo de peneiras. Depositou-se a amostra na peneira de maior abertura e o conjunto foi tampado e posicionado no agitador mecânico, fixando as peneiras e ligando-o em seguida. Após 15 minutos de agitação à frequência de 15 Hz, foi pesado o material retido na primeira peneira, tomando-se o cuidado de pincelar a tela pelos dois lados de forma a não ficar nenhum material retido. Realizou-se o mesmo procedimento para as demais peneiras, pesando também o material retido no fundo.

Os mesmos processos foram realizados em seguida com a amostra da fração pesada das placas de circuito impresso. Imagens do ensaio estão indicadas na Figura 3.9.

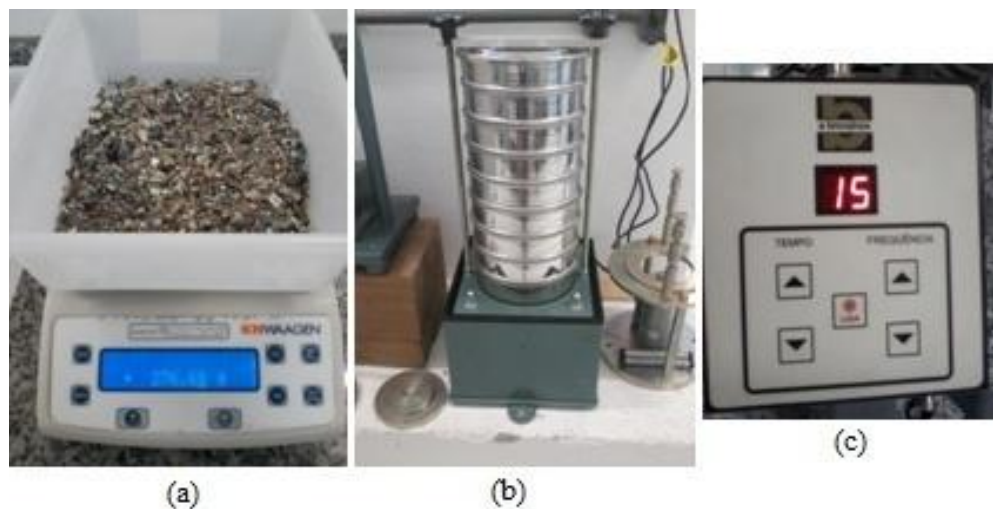


Figura 3.9- (a) Pesagem do material- (b) Conjunto de Peneiras no agitador mecânico- (c) Controle do agitador mecânico

Também foram determinados a dimensão máxima característica, que corresponde à abertura nominal, em mm, da peneira de maior malha na qual o agregado apresenta porcentagem retida acumulada menor ou igual a 5% em massa, e o módulo de finura, dado pela divisão por 100 da soma das porcentagens retidas acumuladas em massa do agregado, nas peneiras da série normal, que compreende as peneiras de malha 9,5 mm a 0,15 mm, conforme determinado pela NBR 248 (ABNT, 2009). Estes valores estão mostrados na Tabela 4.1, da seção de resultados.

3.4.2 Determinação da massa específica dos resíduos moídos de lixo eletrônico

A determinação da massa específica das amostras de fração pesada e leve dos circuitos impressos após a moagem foi realizada de acordo com a NBR 9776 – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman (ABNT, 1987)

Para este ensaio foram necessários os seguintes equipamentos:

-recipiente cerâmico

-frasco Chapman

-bureta

-Balança *Bel Engineering* modelo Mark M 2202 Classe II, com resolução de 0,1 g e faixa nominal de 0,5 g a 2.200 g

-frascos de depósito dos materiais e acessórios.

Inicialmente verificaram-se as duas composições de amostras, leve e pesada (Figura 3.10), e considerou-se que a amostra de fração pesada seria mais adequada para este tipo de ensaio, uma vez que a sua massa específica aparentava ser maior do que a massa específica da água, possibilitando a realização do ensaio.



Figura 3.10 - Amostras utilizadas: Fração pesada (esquerda) e fração leve (direita)

Assim, dando início ao ensaio, adicionou-se 200 ml de água destilada ao frasco Chapman (Figura 3.11), sendo que a primeira leitura foi possibilitada quando o volume atingiu 375 ml, considerando o volume de água e a amostra adicionada. Uma amostra da fração pesada foi separada para obter a sua massa, que a seguir foi adicionada ao frasco por meio de uma colher pequena para que minimizasse a possível perda de material ao transferir para o frasco. Verificou-se que a massa da fração da amostra pesada era mais pesada que a água destilada, uma vez que a amostra afundava ao entrar em contato com a água. Como a

amostra era composta por frações de materiais moídos heterogêneos havia uma pequena parcela do material componente que possuía massa específica menor que a massa específica da água e, conseqüentemente, não afundava. Foi feita a adição de material em volume suficiente para atingir a cota mínima de leitura de 375 ml.

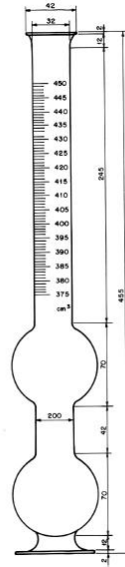


Figura 3.11 - Frasco Chapman

Para a fração leve foi adotado outro procedimento, diferente do método por Frasco Chapman, adotado para determinar a massa específica da amostra de fração pesada. Ao analisar as amostras supôs-se que a amostra de fração leve não apresentaria massa específica maior que a massa específica da água destilada, então se prosseguiu o ensaio com a separação de um frasco, que foi pesado. Este frasco foi cheio com água destilada até a borda, e em seguida a água foi transferida totalmente para a bureta, para determinar a capacidade volumétrica do frasco. Com o frasco seco foi-se adicionando a amostra de fração leve em pequenas quantidades de modo a adensar continuamente o material. O frasco foi preenchido com a composição leve dos resíduos de placas de circuito impresso moídos e colocado na balança para a determinação da massa total adicionada, que correspondia à massa da fração leve. A divisão pela capacidade volumétrica do frasco, previamente anotada, resultou na massa específica da fração leve.

3.4.3 Análise dimensional dos blocos

O correto dimensionamento dos blocos nas suas diversas medidas é condição imprescindível para o bom acabamento das obras, economia de materiais de acabamento e do tempo de execução, sendo, portanto, itens de fundamental importância e totalmente normatizados pela norma NBR 6136 (ABNT,2007), conforme as tabelas 2.4 e 2.5.

As medições foram realizadas com emprego de paquímetro de fabricação Mitutoyo, modelo 160-153, com abertura máxima de 600 mm e precisão de leitura de 0,02 mm, compreendendo as dimensões externas, as espessuras das paredes e a menor dimensão dos furos, sendo algumas medições mostradas na Figura 3.12.



Figura 3.12 - Medição das dimensões externas dos blocos

3.4.4 Teor de umidade dos blocos

O teor de umidade percentual dos blocos foi calculado pela Equação 3.1, de acordo com a descrição de Romagna (2000):

$$U(\%) = \frac{M_3 - M_1}{M_2 - M_1} \times 100 \quad [\text{Eq. 3.1}]$$

Onde, U: Teor de umidade do bloco, em percentual

M_1 : massa do bloco seco em estufa, em kg

M_2 : massa do bloco saturado, em kg

M_3 : massa do bloco seco ao ar, em kg

Para a determinação da massa M_1 , os blocos são levados à estufa com temperatura ajustada para $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ para secagem, devendo permanecer por 24 horas, Figura 3.13-esq. Após resfriamento até a temperatura ambiente os blocos são pesados, Figura 3.13-dir., e levados novamente à estufa por um intervalo de tempo de 2 horas. Retirados e resfriados são

novamente pesados. Esta operação é repetida até que se constate uma variação de massa inferior a 0,5% da pesagem anterior.



Figura 3.13 - Secagem dos blocos em estufa (esq.) e pesagem (dir.).

3.4.5 Absorção de água

Conforme a norma NBR 12118 (ABNT, 2007), a absorção de água, dos blocos é determinada da seguinte forma:

- a- Pesagem dos blocos para determinação da massa seca ao ar, denominada M_3 .
- b- Os blocos são levados à estufa com temperatura ajustada para $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ para secagem, devendo permanecer por 24 horas. Após resfriamento até a temperatura ambiente os blocos são pesados e levados novamente à estufa por um intervalo de tempo de 2 horas. Retirados e resfriados são novamente pesados. Esta operação é repetida até que se constate uma variação de massa inferior a 0,5 % da pesagem anterior. É então anotada a massa seca de cada bloco, denominada M_1 .
- c- Os blocos são imersos em água à temperatura de $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$ por um período de 24 horas. As unidades são retiradas da água, pesadas e novamente imersas por um período de duas horas. Esta operação é repetida até que a diferença entre duas pesagens sucessivas seja inferior a 0,5 %, quando é anotada a massa saturada de cada bloco, denominada M_2 .

As medições foram feitas com três amostras de cada lote de blocos, e com os resultados obtidos foi determinada a absorção de água expressa em porcentagem para cada bloco, de acordo com a Equação 3.2:

$$A (\%) = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 \quad [\text{Eq. 3.2}]$$

Onde: A (%): absorção de água dos blocos dada em porcentagem

M₁: massa do bloco seco em estufa em kg

M₂: massa do bloco saturado em kg

3.4.6 Área bruta e área líquida dos blocos

Para o cálculo da área líquida dos blocos, dada pela Equação 3.3, foi utilizada uma balança hidrostática, onde o bloco saturado foi pesado totalmente imerso em água à temperatura de $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$, como mostrado na Figura 3.14. Esta pesagem foi designada por massa aparente, M₄.

$$A_{\text{liq}} = \frac{M_2 - M_4}{H \times \rho_{\text{H}_2\text{O}}} \quad [\text{Eq. 3.3}]$$

Onde: A_{liq}: área líquida do bloco [mm²]

M₂: massa do bloco saturado [g]

M₄: massa aparente do bloco [g]

H: altura do bloco [mm]

P_{H₂O}: massa específica da água [g/cm³]



Figura 3.14 -Medição da massa aparente com o bloco imerso em água, estando a balança suspensa em suporte e com prato mergulhado no tanque, em montagem hidrostática.

3.4.7 Massa específica dos blocos

Para a determinação das massas específicas seca e saturada das amostras utilizou-se os procedimentos da norma NBR 9778 (ABNT, 2005), que se aplica a concretos e argamassas, adaptados para as unidades de alvenaria, segundo Izquierdo, I. (2011).

As massas específicas foram calculadas com base nas Equações 3.4 e 3.5:

$$\gamma_{espec.seca} = \frac{M_3}{(M_2 - M_4) / \rho_a} \quad [\text{Eq. 3.4}]$$

$$\gamma_{espec.sat} = \frac{M_2}{(M_2 - M_4) / \rho_a} \quad [\text{Eq. 3.5}]$$

Onde:

$\gamma_{espec.seca}$: Massa específica do bloco [g/cm^3]

$\gamma_{espec.saturada}$: Massa específica do bloco [g/cm^3]

M2: Massa do bloco saturado [g]

M3: Massa do bloco seco em ar [g]

M4: Massa aparente do bloco [g]

ρ_a : Massa específica da água [g/cm^3]

3.4.8 Resistência à compressão dos blocos

A resistência à compressão dos blocos vazados de concreto simples para vedação é determinada de acordo com prescrição da NBR 12118 (ABNT, 2010), e sua caracterização é feita em termos de dois parâmetros, a resistência média à compressão (f_{bm}) e a resistência característica à compressão (f_{bk}), sendo assim definidas:

- a- Resistência à compressão: Relação entre a carga de ruptura e a área bruta do corpo de prova quando submetido ao ensaio de compressão axial.
- b- Área bruta: Área da seção perpendicular ao eixo dos furos, sem desconto das áreas dos vazios.
- c- Resistência média à compressão: média aritmética dos resultados obtidos em ensaios de compressão, na quantidade de blocos determinada pela NBR 6136 (ABNT, 2007).

- d- Resistência característica à compressão: tratamento estatístico dado aos resultados obtidos em ensaios de compressão de uma amostra de blocos, que procura assegurar que 95 % dos blocos tenham suas resistências à compressão em valores iguais ou superiores a este valor.

Inicialmente foram determinadas as áreas brutas dos blocos, sendo calculadas pelos valores médios de medições em três pontos distintos de cada bloco. A resistência de cada bloco foi calculada pela divisão da carga de ruptura resultante dos ensaios pela área bruta calculada, sendo o resultado expresso em MPa.

O processo de ensaio consiste na compressão do bloco em prensa equipada com dois pratos de aço de dimensões superiores às faces do bloco e que agem como elementos de apoio e de aplicação da força de compressão, sendo um deles articulado. É de grande importância o alinhamento do bloco, de forma que o seu centro de gravidade seja coincidente com o centro de carga dos pratos de aço. Para evitar a concentração de tensões devido às irregularidades da superfície dos blocos, a norma determina que seja feita a retífica da superfície ou o capeamento, que deve ser feito com material que ofereça resistência no mínimo igual à do bloco a ser ensaiado, e que tradicionalmente é executado com gesso, enxofre, ou pasta cimento. Foi utilizada a pasta de cimento, resultado da mistura na proporção de 1:1 de cimento Portland ARI e areia fina, com água o suficiente para uma consistência trabalhável, sem excesso de escorrimento. Na Figura 3.15 são mostrados os três conjuntos de blocos preparados para o teste de compressão, após o capeamento. Na Figura 3.16 é mostrado um bloco posicionado entre os pratos de compressão da prensa hidráulica, onde se vê, também, a unidade eletrônica de controle da prensa, marca Contenco, modelo I-3025-B – Digital. Na Figura 3.17 é apresentado um bloco após o rompimento.



Figura 3.15- Blocos preparados para ensaios de compressão através do capeamento com pasta de cimento nas duas faces de assentamento.



Figura 3.16 - Prensagem do bloco em prensa hidráulica com controle da taxa de crescimento da força aplicada.



Figura 3.17 - Bloco rompido após ser atingido o limite de resistência à compressão.

A Resistência Característica é calculada pela Equação 3.6:

$$f_{bk} = 2 X \left[\frac{f_{b1} + f_{b2} + \dots + f_{b(i-1)}}{i - 1} \right] - f_{bi} \quad [\text{Eq. 3.6}]$$

Sendo:

$$i = n/2 \quad \text{para } n \text{ par} \quad [\text{Eq. 3.7}]$$

$$i = \frac{(n+1)}{2} \quad \text{para } n \text{ impar} \quad [\text{Eq. 3.8}]$$

Onde n é o número de blocos da amostra, $f_{b1}, f_{b2} \dots f_{bi}$ é a resistência à compressão dos blocos, ordenada crescentemente, de modo que f_{b1} é o menor valor e f_{bn} é o maior valor.

Por este cálculo fica estabelecida a probabilidade de que apenas 5 % do lote possam ter suas resistências individuais abaixo do valor f_{bk} .

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Materiais utilizados na fabricação dos blocos

4.1.1 Composição granulométrica dos agregados de resíduos eletrônicos

Os resultados das massas retidas, das porcentagens retidas e retida acumulada do ensaio descrito em 3.4.1, com aproximação de 0,1%, estão indicados na Tabela 4.1 e foram obtidos pelo peneiramento com a série normal de peneiras em agitador eletromecânico pelo período de 15 minutos com frequência de 15 Hz.

Tabela 4.1 - Valores obtidos no ensaio - Frações Leve e Pesada

Abertura da Peneira (mm)	Massa retida (grama)		% da massa retida		% da massa retida acumulada	
	Leve	Pesada	Leve	Pesada	Leve	Pesada
15	0	0	0	0	0	0
9,6	2,52	2,76	2,856	0,998	2,856	0,998
4,8	14,37	28,98	16,283	10,474	19,139	11,472
2,4	15,03	100,99	17,031	36,501	36,170	47,972
1,2	14,86	90,59	16,839	32,742	53,008	80,714
0,6	10,89	35,37	12,340	12,784	65,348	93,498
0,3	10,52	14,16	11,921	5,118	77,269	98,616
0,15	6,80	2,46	7,705	0,889	84,975	99,505
Fundos	13,26	1,37	15,025	0,495	100	100

Vale-se ressaltar que os valores retidos individualmente não devem diferir mais que 4 % entre si, caso isso ocorra deve-se repetir o peneiramento, e que o somatório de todas as massas não deve diferir de 30 % da massa total (NBR NM 248, 2003).

É apresentada também uma terceira curva que considera os resíduos eletrônicos moídos sem separação entre as frações leve e pesada. Para esta curva foi feito um ajuste na tabela, de forma a se manter a proporção em que a fração leve corresponde a 33,4 % do peso do material entregue pelo moinho, e a fração pesada aos restantes 66,6 %. Estes resultados são apresentados na Tabela 4.32, enquanto a Tabela 4.3 apresenta as dimensões máximas características e os módulos de finura, e no gráfico da Figura 4.1, são apresentadas as curvas granulométricas das frações leve, pesada e total.

O módulo de finura é calculado dividindo-se por 100 a soma dos percentuais retidos acumulados nas peneiras da série normal, cujas aberturas de malha vão de 0,15 mm a 9,6 mm, conforme NBR 5734 (ABNT, 1989), sendo o resultado um número adimensional, e quanto menor o seu valor, mais fino é considerado o material.

A dimensão máxima característica é determinada pela malha da maior peneira cujo percentual retido acumulado é menor ou igual a 5 %.

Tabela 4.2 – Valores de ensaio de granulometria para os resultados combinados das frações leve e pesada dos resíduos eletrônicos.

Abertura da Peneira (mm)	Massa retida (grama)			% da massa retida			% da massa passante acumulada		
	Leve Ajustada	Pesada	Leve + Pesada	Leve	Pesada	Leve + Pesada	Leve	Pesada	Leve + Pesada
15	0	0	0	0	0	0	100	100	100
9,6	3,96	2,76	6,72	2,85	0,99	1,61	91,15	99,01	98,39
4,8	22,59	28,98	51,57	16,28	10,47	12,41	80,67	88,54	85,98
2,4	23,63	100,99	124,62	17,03	36,50	30,00	63,84	52,04	55,98
1,2	23,36	90,59	113,95	16,83	32,74	27,43	47,01	19,30	28,55
0,6	17,12	35,37	52,49	12,33	12,78	12,63	34,68	6,52	15,92
0,3	16,54	14,16	30,70	11,92	5,11	7,39	22,70	1,41	8,53
0,15	10,69	2,46	13,15	7,70	0,88	3,16	15,06	0,50	5,37
Fundos	20,85	1,37	22,22	15,03	0,49	5,34	0,03	0,53	0,03
Σ	138,74	276,68	415,40	99,97	99,47	99,97	-	-	-

Tabela 4.3- Dimensão máxima característica e módulo de finura.

Amostra/Fração	Dimensão máxima característica	Módulo de finura
Leve	9,6 mm	3,38
Pesada	9,6 mm	4,32
Leve + Pesada	9,6 mm	4,01

Na Figura 4.1 são apresentadas as curvas granulométricas dos percentuais passantes para as frações leve, pesada e total dos resíduos eletrônicos.

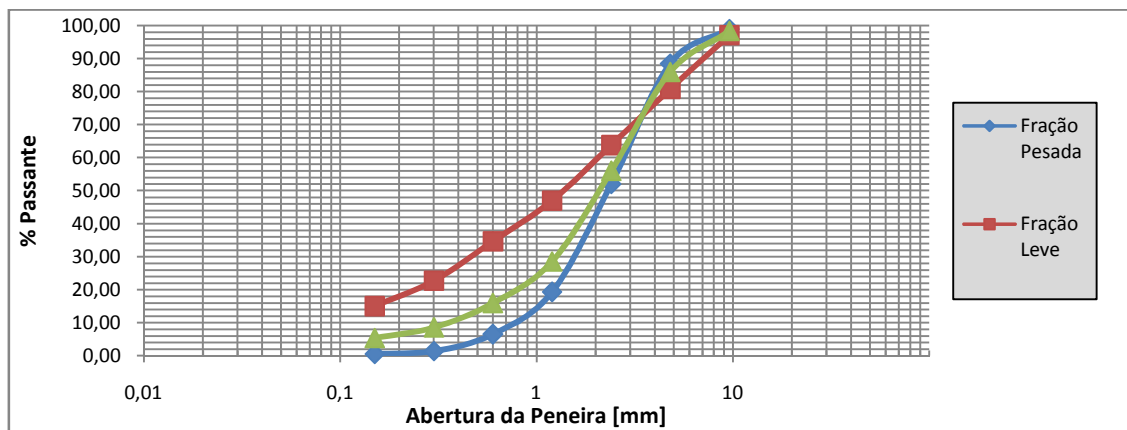


Figura 4.1: Curva granulométrica das frações leve, pesada e total dos resíduos eletrônicos.

4.1.2 Características do cimento utilizado

Na fabricação dos blocos foi utilizado cimento Portland tipo ARI (Alta Resistência Inicial), que apresenta altas resistências no início do processo de cura, característica fundamental na fabricação dos blocos de concreto por possibilitar a movimentação dos blocos necessária ao fluxo de produção, sem que ocorram danos aos blocos. O cimento empregado nestes lotes de blocos, marca Holcim, tipo/classe CP V ARI PLUS, produzido na fábrica de

Pedro Leopoldo-MG apresentava as características físicas e químicas que estão mostradas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Características do cimento

Propriedades Físicas		Propriedades Químicas	
Blaine (m ² /kg)	4820	Teor de CO ₂ (%)	1,15
Início de pega (min)	134	Teor de SO ₃	2,89
Fim de pega (min)	195	Teor de SiO ₂	18,86
Resistência à compressão 1 dia (MPa)	29,1	Teor de Al ₂ O ₃	4,80
Resistência à compressão 3 dia (MPa)	41,0	Teor de CaO	63,98
Resistência à compressão 7 dia (MPa)	45,2	Perda ao fogo 1000° C	3,55
Resistência à compressão 28 dia (MPa)	53,0	Perda ao fogo 500° C	0,78

Todos os resultados apresentados na Tabela 4.4 estão dentro dos limites determinados pela norma NBR 5773 (ABNT,1991).

4.1.3 Características da areia

A composição granulométrica da areia foi determinada de acordo com a NBR e o processo de peneiramento e medição das parcelas foi idêntico ao descrito anteriormente, no item 4.1.1, sendo o mesmo aplicado nas caracterizações dos agregados finos e mistos. Para as medições com a areia, utilizando as peneiras da série normal, com tempo de peneiramento de 15 minutos e frequência de 15 Hz, foram levantados os resultados apresentados na Tabela 4.55.

Tabela 4.5: Frações obtidas no peneiramento da areia.

Abertura da peneira(mm)	Massa retida (gramas)	%Retido	% Retido acumulado	% Passante acumulado
9,6	0	0	0	100
4,8	0	0	0	100
2,4	54,19	10,84	10,84	89,16
1,2	83,66	16,73	27,57	72,43
0,6	92,27	18,45	46,02	53,98
0,3	89,65	17,93	63,95	36,05
0,15	92,38	18,47	82,42	17,58
0,075	60,42	12,08	94,50	5,50
Fundo	27,48	5,50	100,00	0,0
Σ	500,05	-	-	-

A dimensão máxima característica dos grãos de areia, foi determinada em 4,8 mm e o módulo de finura tem o valor de 2,30. A massa específica aparente foi medida, com o valor de 2,45 g/cm³.

4.1.4 Características do agregado fino

Tabela 4.6: Frações obtidas no peneiramento do agregado fino.

Abertura da peneira (mm)	Massa retida (gramas)	%Retido	% Retido acumulado	% Passante acumulado
9,6	0	0	0	100
4,8	0	0	0	100
2,4	35,69	7,14	7,14	92,86
1,2	322,46	64,61	71,75	28,25
0,6	140,67	28,15	99,9	0,10
0,3	0,65	0,013	99,913	0,08
0,15	0,08	0,016	99,929	0,07
0,075	0,02	0,004	99,933	0,06
Fundo	0,13	0,026	99,959	0,05
Σ	499,70	-	-	-

A dimensão máxima característica dos grãos dos agregados finos é de 4,8 mm, o módulo de finura tem o valor de 3,78 e a massa específica aparente foi encontrada com o valor de 2,52 g/cm³.

4.1.5 Características dos agregados mistos

Tabela 4.7: Frações obtidas no peneiramento dos agregados mistos.

Abertura da peneira(mm)	Massa retida (gramas)	%Retido	% Retido acumulado	% Passante acumulado
9,6	0	0	0	100
4,8	30,30	6,04	6,04	93,96
2,4	127,19	25,36	31,40	68,60
1,2	83,86	16,72	48,12	51,88
0,6	68,57	13,67	61,79	38,21
0,3	61,05	12,17	73,96	26,04
0,15	52,78	10,52	84,48	15,52
0,075	37,32	7,44	91,92	8,08
Fundo	40,43	8,06	99,98	0,02
Σ	501,50	-	-	-

A dimensão máxima característica dos agregados mistos é de 9,6 mm e o módulo de finura tem o valor de 3,05. A massa específica aparente foi determinada, com o valor de 2,36 g/cm³. Embora os agregados mistos apresentem um módulo de finura menor que o dos

agregados finos, esta denominação é dada, internamente nas Indústrias Crabi, pela malha da peneira onde é feita a seleção, ou seja, pela dimensão máxima característica.

4.1.6 Características da brita

Tabela 4.8: Frações obtidas no peneiramento da brita.

Abertura da peneira(mm)	Massa retida (gramas)	%Retido	% Retido acumulado	% Passante acumulado
19,0	117	3,86	3,86	96,14
9,6	582	19,19	23,04	76,96
4,8	568,4	18,74	41,78	58,22
2,4	377,5	12,44	54,22	45,78
1,2	355,2	11,71	65,93	34,07
0,6	296,7	9,78	75,71	24,29
0,3	177,2	5,84	81,55	18,45
0,15	222,6	7,34	88,89	11,11
0,075	182,7	6,02	94,91	5,09
Fundo	154,3	5,09	100,0	0,0
Σ	3.033,6			

A dimensão máxima característica da brita é de 19,0 mm. A massa específica aparente foi determinada, com o valor de 2,61 g/cm³.

Na Figura 4.2 são apresentadas as curvas granulométricas de porcentual passante por peneira dos resíduos eletrônicos totais, que englobam as frações leve e pesada nas proporções que são produzidas pelo moinho de martelos, e as curvas granulométricas dos agregados, compreendendo a areia, os finos, os mistos e a brita.

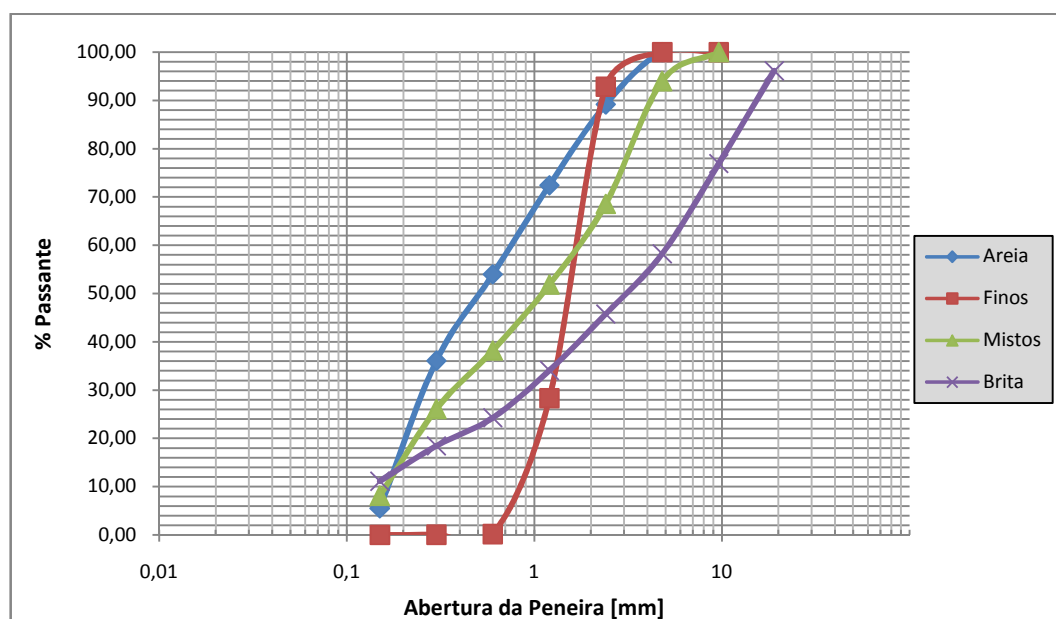


Figura 4.2: Curvas granulométricas dos resíduos eletrônicos e dos agregados.

4.2 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS BLOCOS

4.2.1 Ensaio dimensional dos blocos

Na Tabela 4.9 encontram-se apresentados os resultados do ensaio dimensional dos blocos.

Tabela 4.9: Ensaio Dimensional dos Blocos – Dimensões Externas

Lote de Bloco	Comprimento (mm)			Largura (mm)			Altura (mm)		
	Média	s	C.V. (%)	Média	s	C.V. (%)	Média	s	C.V. (%)
A0 %	393,63	0,31	0,08	91,57	0,60	0,65	189,50	2,13	1,12
B 1,5 %	394,35	0,34	0,08	91,40	1,17	1,28	188,65	1,23	0,65
C 2,0 %	393,93	0,24	0,06	91,27	0,61	0,67	189,42	1,57	0,82

A tolerância de $\pm 3,0$ mm no comprimento, com os limites de 387,0 mm mínimo e 393,0 mm máximo foi excedida para as três composições de blocos, o que requer uma revisão do molde, cuja estrutura terá sofrido desgaste por abrasão, o que é previsto pelo fabricante. As outras dimensões, largura e altura estão dentro dos limites de tolerância, respectivamente de $\pm 2,0$ e $\pm 3,0$ mm, sendo que a altura é a dimensão menos problemática em termos práticos, com relação ao assentamento dos blocos, uma vez que a junta de argamassa normalmente tem a espessura de 10 mm e age como um elemento nivelador, absorvendo eventuais diferenças entre um bloco e outro.

Tanto as paredes longitudinais quanto as paredes transversais atendem integralmente a norma por superarem a medida mínima que é de 15 mm, o mesmo acontecendo com a espessura equivalente, cujo mínimo é de 113 mm/m, e as medições apresentaram 168,20 mm/m para os blocos A, 173,29 mm/m para os blocos B e 171,74 mm/m para os blocos C (vide Tabela 4.10).

Tabela 4.10: Ensaio dimensional dos blocos – Dimensões das paredes

Lote de Bloco	Espessuras medidas das paredes (mm)					
	Paredes Longitudinais			Paredes Transversais		
	Média	s	C.V.(%)	Média	s	C.V.(%)
A 0 %	21,97	1,18	5,37	22,07	0,40	1,81
B 1,5 %	22,98	0,91	3,95	22,78	0,53	2,32
C 2,0 %	22,97	0,48	2,08	22,42	1,03	4,59

A NBR 6136 (2007) não especifica uma dimensão mínima para a menor dimensão dos furos dos blocos não estruturais (vide Tabela 4.11), cujo valor passa a ser dependente da

menor espessura das paredes e da largura do bloco que, para os elementos de vedação de módulo M-10, é de 90 mm. Observa-se, entretanto, que a menor dimensão dos furos, que ocorre no sentido transversal, é da ordem de 50 % da largura do bloco, sendo o restante preenchido pelas espessuras das duas paredes transversais.

Tabela 4.11: Ensaio dimensional dos blocos – Dimensões dos furos

Lote de Bloco	Menor dimensão dos furos (mm)		
	Média	s	C.V.(%)
A 0 %	45,43	0,78	1,71
B 1,5 %	46,82	1,30	2,77
C 2,0 %	46,72	0,65	1,39

4.2.2 Massa dos blocos secos ao ar

Considerando que no processo de fabricação dos blocos de concreto uma das etapas é a prensagem simultânea à vibração, quando ocorre o adensamento do concreto, é interessante conhecer o peso dos blocos secos ao ar, de forma a observar se há influência da presença dos resíduos nesta etapa. Na Tabela 4.2 são mostrados os resultados para uma amostragem de cinco unidades de cada lote de bloco, onde se observa uma redução nos pesos médios para os blocos contendo resíduos eletrônicos. Como o processo de alimentação da vibro-prensa é automatizado, e foram mantidos os mesmos parâmetros para todos os blocos, eventuais diferenças observadas devem ser atribuídas à presença dos resíduos eletrônicos no compósito.

Tabela 4.12: Massa dos blocos secos ao ar

Lote de Bloco	Massa Kg		
	Média	s	C.V. (%)
A 0 %	10,232	0,23	2,29
B 1,5 %	9,811	0,19	1,99
C 2,0 %	9,883	0,156	1,58

O teste ANOVA para este ensaio confirma as diferenças entre os pesos médios do lote A – sem resíduos – em relação aos pesos médios dos lotes B e C – com resíduos, enquanto que os lotes B e C não apresentam diferenças significativas entre as suas médias de pesos.

4.2.3 Teor de Umidade dos Blocos

Os teores de umidade dos blocos ensaiados estão dentro das especificações da norma para a condição existente no Laboratório de Estruturas da UNIFEI, que apresenta um teor de umidade do ar variando na faixa de 40 % a 70 % (vide Tabela 4.13).

Tabela 4.23: Teor de umidade dos blocos

Lote de Bloco	Teor de umidade (%)		
	Média	s	C.V.(%)
A 0 %	13,01	1,79	13,72
B 1,5 %	9,57	3,24	33,83
C 2,0 %	9,13	2,96	32,39

4.2.4 Absorção de Água dos Blocos

Na Tabela 4.14 são apresentados os resultados dos ensaios de absorção de água.

Tabela 4.3: Absorção de água dos blocos

Lote de Bloco	Absorção de água (%)		
	Média	s	C.V.(%)
A 0 %	5,80	0,32	5,58
B 1,5 %	8,16	0,30	3,73
C 2,0 %	7,05	0,20	2,90

Observou-se um aumento no índice de absorção, explicitado na Tabela 4.15, e que pode ser atribuído a uma maior porosidade do concreto constituinte dos blocos.

Tabela 4.45: Comparativo dos resultados dos ensaios de absorção de água por blocos sem e com a adição de resíduos.

Tipo de Bloco	Absorção de água (%)	Relação com A 0 %	Varição relativa a A 0 % (%)
A 0 %	5,80	1	0
B 1,5 %	8,16	1,40	+ 40
C 2,0 %	7,05	1,21	+ 21

4.2.5 Área bruta e área líquida dos blocos

Os valores apresentados, muito semelhantes entre si, decorrem das unidades terem sido produzidas nos mesmos moldes (vide Tabela 4.16), e estão dentro dos limites de enquadramento para a classificação como blocos vazados.

Tabela 4.5: Área bruta e área líquida dos blocos

Lote de Bloco	Área bruta (mm ²)	Área líquida(mm ²)	A _{líq} /A _{br} (%)
A 0 %	36.044,69	23.372,20	64,84
B 1,5 %	36.043,59	23.983,56	66,54
C 2,0 %	35.953,99	24.170,97	67,22

4.2.6 Massa específica dos blocos

A Tabela 4.17 apresenta os dados da massa específica dos blocos.

Tabela 4.6: Massa específica dos blocos

Lote de Blocos	Massa específica seca ao ar (g/cm ³)			Massa específica saturada (g/cm ³)		
	Média	s	C.V. (%)	Média	s	C.V. (%)
A 0 %	2,30	0,13	5,50	2,42	0,14	5,80
B 1,5 %	2,12	0,02	0,77	2,27	0,01	0,42
C 2,0 %	2,14	0,00	0,05	2,28	0,01	0,41

As massas específicas, tanto dos blocos secos ao ar quanto dos blocos saturados de água, apresentaram valores menores para os blocos contendo resíduos eletrônicos moídos, quando comparados aos blocos normais de série em percentuais mostrados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Comparativo entre os blocos com e sem adição de resíduos eletrônicos para as massas específicas seca ao ar e saturada.

Lote de Blocos	Massa específica média seca ao ar (g/cm ³)	Relação com os blocos tipo A	Variação relativa aos blocos tipo A (%)	Massa específica média saturada (g/cm ³)	Relação com os blocos tipo A	Variação relativa aos blocos tipo A (%)
A 0 %	2,30	1	0	2,42	1	0
B 1,5 %	2,12	0,9217	-7,82	2,27	0,9380	-6,19
C 2,0 %	2,14	0,9304	-6,95	2,28	0,9421	-5,78

Os volumes dos blocos permaneceram praticamente inalterados, o que foi possível de se verificar pelos ensaios dimensionais dos blocos e, também, pela variação dos pesos entre os blocos secos ao ar e os blocos mergulhados em água, dados que foram levantados por ocasião da determinação das massas aparentes, medidas com a balança hidrostática. Então estas variações das massas específicas, tanto a seca quanto a saturada, devem-se a um menor adensamento, ou menor grau de compactação, do concreto constituinte dos blocos contendo resíduos eletrônicos, que foi constatado na avaliação das massas dos blocos secos ao ar, que apresentaram volumes iguais.

4.2.7 Resistência à compressão dos blocos com e sem adição de resíduos de placas de circuito impresso

Os ensaios de ruptura sob compressão, realizados aos 28 dias de cura, resultaram nos valores apresentados na Tabela 4.89.

Tabela 4.8: Resistência à compressão dos blocos com e sem adição de resíduos de placas de circuito impresso

Lote de Blocos	Resistência à compressão dos blocos (MPa)			
	Média	s	C.V.(%)	Caracter.(fbk) (MPa)
A 0 %	10,38	1,085	10,45	8,5
B 1,5 %	7,73	0,294	3,80	7,0
C 2,0 %	5,16	0,615	11,91	4,1

Os resultados, tanto em valor individual de cada bloco das séries com resíduos, B e C, quanto em valor médio, estão acima do mínimo exigido pela norma, validando a aplicação destes blocos como elementos de vedação em construções de alvenaria. Na Tabela 4.2020 é apresentado um comparativo das médias para cada série.

Tabela 4.20: Comparativo entre os blocos com e sem adição dos resíduos de placas de circuito impresso.

Tipo de Bloco	f_{bm} (MPa)	Relação com A 0 %	Variação relativa a A 0 % (%)
A 0 %	10,38	1	0
B 1,5 %	7,73	0,744	-25,52
C 2,0 %	5,16	0,497	-50,28

Embora a adição dos resíduos moídos de placas de circuito impresso tenha sido feita em pequenos percentuais (1,5 % e 2,0 %), em substituição a iguais massas de agregados do concreto, a redução da resistência à compressão se deu em percentuais bem mais elevados (25,52 % e 50,28 % respectivamente), o que provoca uma busca das possíveis causas.

Um primeiro fator a ser considerado na análise das reduções de resistência à compressão que foram observadas, é a possível influência das características físicas dos resíduos eletrônicos moídos no grau de adensamento do concreto, que ocorre na etapa da prensagem durante o processo de fabricação dos blocos. A resistência está diretamente relacionada à eficiência do adensamento, e isto se dá de forma tão notável que, para atingir a mesma resistência à compressão, permite-se trabalhar com traços mais fracos quando o processo de vibração é mais intenso, como é mostrado no gráfico Resistência x Traço da Figura 2.16. As reduções observada nas massas específicas seca e saturada indicam o menor adensamento. Consultada, a Indústria Crabi informou que o tempo de adensamento, que é o

tempo em que é aplicada a vibração no processo de prensagem, foi o mesmo para todos os lotes, e que seu controle é feito eletronicamente através do painel de comando da vibroprensa. Esta redução do adensamento ficou evidente nos ensaios de pesos dos blocos com e sem a adição de resíduos eletrônicos, onde os testes estatísticos atestam a diferença entre os grupos, sendo que os grupos com resíduos apresentaram menores pesos para os mesmos volumes.

Os ensaios de massas específicas dos resíduos eletrônicos moídos e dos agregados utilizados na fabricação dos blocos apresentaram os valores mostrados na Tabela 4.21, abaixo, onde se verifica que embora a discrepância seja significativa, se considerado que a proporção máxima de substituição dos agregados foi de 2 % em peso, a alteração da massa específica do conjunto de agregados mais os resíduos é pequena, conforme a lei das misturas.

Tabela 4.21 – Resultados dos ensaios de massa específica dos agregados e resíduos

Material	Resíduos Fração Leve	Resíduos Fração Pesada	Resíduos Total	Areia	Agregados Finos	Agregados Mistos	Brita
Massa específica [g/cm ³]	0,52	2,02	1,27	2,45	2,52	2,36	2,61

Um segundo fator, possível contribuinte para a redução da resistência à compressão, e cuja afirmação demanda por maiores investigações, seria a constituição de parte dos componentes da fração leve dos resíduos eletrônicos moídos. Esta fração é composta basicamente por partes de fibra de vidro do substrato das placas de circuito impresso, de formato filamentar, e por filmes muito finos de alumínio recobertos com óxido de alumínio, originados na trituração dos capacitores eletrolíticos. Tanto os filamentos de fibra de vidro quanto os filmes são totalmente flexíveis, o que é uma característica indesejável para os aglomerados, onde se busca a rigidez mecânica. Ademais, os fragmentos de filmes apresentam superfícies lisas, sem rugosidade, dificultando a aderência do aglomerante a estes fragmentos no processo de solidificação, o que provavelmente deve contribuir para uma redução localizada da resistência mecânica.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os ensaios realizados com os blocos de concreto destinados ao uso como elementos de vedação em construções de alvenaria (portanto, blocos sem função estrutural), contendo resíduos moídos de placas de circuito impresso, apresentaram resultados satisfatórios em todos os aspectos previstos pelas normas, assegurando que sua aplicação pode ser feita sem reservas.

Com relação à resistência à compressão, embora tenham sido observadas reduções relevantes, tanto nos blocos com 2 % de resíduos eletrônicos quanto nos blocos com 1,5 % de resíduos, estes blocos ainda apresentaram índices de resistência superiores aos determinados pelas normas, tanto para as resistências individuais, quanto para as resistências médias e características. Os resultados obtidos e as comparações entre os blocos com o sem resíduos eletrônicos foram feitos com os produtos de um único fabricante, cujos blocos de vedação apresentam os índices de resistência característica à compressão, f_{bk} , em 10,38 Mpa, expressivamente superiores aos valores mínimos exigidos pela norma, que é de 2,0 MPa.

Embora cada fabricante adote traços diferentes, o dimensionamento dos blocos de vedação do módulo M-10 favorece o aumento da resistência individual devido à baixa proporção da área de vazios em relação à área de paredes, de forma que se pode esperar que seja normal a constatação, em blocos de outros fabricantes, de índices de resistência característica à compressão, f_{bk} , superiores, com folga, aos mínimos estabelecidos pela norma, resultando na possibilidade de permanecerem acima do mínimo quando da inclusão dos resíduos moídos de placas de circuito impresso.

Observou-se também redução de peso nos blocos contendo resíduos, sendo em valores médios de 421 gramas para os blocos contendo 1,5 % de resíduos e de 350 gramas para os blocos contendo 2,0 % de resíduos. Estes blocos apresentaram os mesmos volumes dos blocos sem resíduos, o que foi constatado nas medições com a balança hidrostática. A redução do peso, para o mesmo volume, indicou uma queda no adensamento que o concreto dos blocos com resíduos sofreu durante o processo de prensagem no molde.

A resistência à compressão dos blocos está diretamente ligada ao índice de adensamento, que pode ser controlado através da vibração aplicada, pelo ajuste de algumas variáveis como a frequência, a magnitude da aceleração e o tempo de aplicação. Na fabricação das três séries destes blocos foram mantidos fixos estes parâmetros, de forma a não

exercerem influência no experimento. É possível que um ajuste para maior no tempo de aplicação da vibração, durante o processo de prensagem, seja eficaz no aumento da resistência dos blocos contendo resíduos, de forma a reduzir a diferença destes para os blocos de produção normal, sem adição de resíduos do lixo eletrônico.

A separação das placas de circuito impresso, que são uma fração do lixo eletrônico, implica numa operação de desmontagem manual. Como os tipos, funções, marcas, modelos e estado em que se encontram os equipamentos eletro eletrônicos descartados como lixo são muito variáveis, a experiência dos operadores é fundamental para se atingir bons índices de produtividade, o que pode ser incrementado com a utilização de ferramentas elétricas como desparafusadeiras e tesouras. Os processos de trituração e moagem fazem parte das primeiras etapas das plantas de recuperação de metais, seja por pirometalurgia ou hidrometalurgia, de forma que os resíduos moídos das placas de circuito impresso podem ser também destinados a estas plantas sem que ocorra qualquer prejuízo técnico ou econômico.

A fabricação dos blocos contendo resíduos eletrônicos moídos não requer qualquer modificação nos equipamentos das fábricas de blocos, e com relação ao processo, reflete-se apenas na inclusão de mais uma operação de pesagem deste novo componente.

Os resultados observados indicam a viabilidade desta proposta, mas apontam também a necessidade de mais estudos, sugerindo-se:

- Experimentos buscando maior índice de adensamento do concreto na fabricação dos blocos com resíduos, através da variação dos parâmetros de controle, e do porcentual da fração leve dos resíduos eletrônicos moídos, o que pode resultar em aumento da resistência à compressão;
- Experimentos de novos ajustes do moinho de martelos buscando reduzir os tamanhos das partículas de formato filamentar e laminar da fração leve, com o objetivo tornar menor a influência dos resíduos na redução da resistência à compressão dos blocos;
- Experimentos de lixiviação e solubilização de fragmentos dos blocos de forma a medir as concentrações de substância tóxicas nos extratos obtidos, e experimentos de lixiviação e solubilização de fragmentos de placas de circuito impresso, com o propósito de comparar os resultados com aqueles dos blocos, buscando comprovar os efeitos benéficos do encapsulamento dos resíduos em matriz cimentícia no processo de descarte de lixo eletrônico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABINEE – **Panorama Econômico e Desempenho Setorial – 2010**- Associação Brasileira da Indústria Eletro e Eletrônica – 19 de Março de 2010 – <http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/pan2011.pdf> - Acessado em 8 de Agosto de 2012.

ANDRADE R. **Caracterização e classificação de placas de circuito impresso de computadores como resíduos sólidos**. 2002 – 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)– Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Estadual de Campinas.

ANDREOLA F., BARBIERI I., CONRADI A., FERRARA A.M., LANCELLOTTI I., NERY P., **Recycling of EOL CRT glass into ceramic glaze formulations and its environmental impact by ICA approach**. International Journal of Life Cycle Assessment. V 25, P 307-318, 2007.

ASANTE K. A., ADU-KUMI S., NAKAHIRO K., TAKAHASHI S., ISOBE T., SUDARYANTS A.,DEVANATHAN G., CLARKE E., AUSA-ASARE O.D., DAPAAH-SIAKNAN S., TANABE S., **Human exposure to PCB's, PBDEs and HBCDs in Ghana: temporal variation, sources of exposure and estimation of daily intake by infants**-Environment International- v.37 – Issue 5 – p 921-928 – July 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45: Agregados-determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: Agregados-determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial**. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6136: Blocos vazados simples de concreto para alvenaria**. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto- especificação**. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776: Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman.** Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação.** Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduo sólido.** Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduo sólido.** Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12118: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, 2007.

ASSUNÇÃO J.V., PESQUERO C.R. **Dioxinas e furanos: origens e riscos.** Revista de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, v33, n5, p 523-530, out. 1999.

AYALA V.G., **Resíduos eletrônicos en Paraguay – Los residuos electrónicos: Um desafio para la sociedad del conocimiento en America Latina y El Caribe – UNESCO – Montevideo, 2010.**

BARBA-GUTIERREZ Y., ADENSO-DIAZ B., HOPP M., **An analysis of some environmental consequences of european electrical and electronic waste regulation.** Resources, Conservation and Recyclingv. 52, Issue 3, p. 481-495, jan. 2008.

BARROS H.B., CATAI R.E., TEIXEIRA C.A., **Bloco de vedação ecologicamente correto.** 17º CBECIMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. 9 p. Foz do Iguaçu, Nov. 2006.

BARROS R.M., **Tratado sobre resíduos sólidos – gestão, uso e sustentabilidade.** – Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2013. P

BEDÊ M.A., **Estudo da indústria de artefatos de cimento no Estado de São Paulo, SEBRAE-SP – Serviço de Apoio às Micro e Pequenas Empresas de São Paulo, 2002,**

http://www.sebraesp.com.br/arquivos_site/biblioteca/EstudosPesquisas/estudos_setoriais/artefatos_cimento.pdf -Acesso em 6 -Setembro- 2013

BERNARDES M.S. **Os desafios para efetivação da política nacional de resíduos sólidos frente a figura do consumidor-gerador.** Revista Eletrônica do Curso de Direito – UFSM. Vol.8 - 2013

BI X., SIMONEIT B.R.T., WANG X., SHENG G., FU J., **The major components of particles emitted during recycling of waste printed circuit boards in typical e-waste workshop of South-China.** Atmospheric Environment v 44, p. 4440-4445, 2010.

BRASIL. **Lei Nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei Nº 9.605 de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 03 de agosto de 2010.Seção 1.

BRASIL. **Decreto Nº 7.404 de 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Lei Nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 23 de dezembro de 2010.Seção 1 – Edição Extra.

BRITO A. L. F., **Protocolo de avaliação de materiais resultantes da solidificação/estabilização de resíduos,** 2007, 179 p. Tese (Doutorado engenharia ambiental), Centro Tecnológico – Universidade Federal de Santa Catarina.

CAI Z.W., JIANG G.B., **Determination of polybrominated diphenyl ethers in soil from e-waste recycling site.** TALANTA, v 70, p 88-90, 2006.

CAUDURO F., ROBERTO S. **Avaliação comparativa de testes de lixiviação de resíduos sólidos.** XXVIII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cancún, out. 2002.

CEF-GIDUR/VT, **Cadernos Caixa – projeto padrão – casas populares 42 m²-** Vitória – ES, jan. 2007.

CHEN Q.Y., TYRER M., HILLS C.D., YANG X.M., CAREY P. **Immobilisation of heavy metal in cement-based solidification/stabilization: A review.** Waste Management, v 29, p 390-403, 2009.

COMISSÃO DAS COMUNIDADES EUROPÉIAS – **Proposta de directiva do Parlamento Europeu e do Conselho relativa aos resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos (REEE)** – Bruxelas, 3-12-2008 – Texto em português.

COOPER T. **Inadequate life? Evidence of consumer attitudes to product obsolescence.** Journal of Consumer Policy, 27 – pp 421-449, 2004.

COSTA M.H.P., OLIVEIRA M.T.T., MAIA L.C.C., PAULA V.A.F. **Geração e destinação de lixo eletrônico: um estudo de caso em empresa de telecomunicações.** 2010 – www.web-resol.org/textos/576-302.pdf - Acesso em 15 – Maio - 2013

CNBB – **Bíblia Sagrada** – Tradução da CNBB – 1652 p. Edições CNBB, Brasília, 2012

COUTINHO, M. **Metas da política de resíduos sólidos podem ser adiadas.** www.estadao.com.br/noticias/impreso,metas-da-politica-de-residuos-solidos-podem-ser-adiadas,961634,0.htm – Acesso em 22 – Novembro-2012

CRABI, 2013 – **Informação passada pelo diretor da empresa, Sr. Luis Carlos Crabi**, em reunião ocorrida na sede da empresa, dia 05/8/2013.

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

CUI J.R., ZHANG I.F., **Metallurgical recovery of metals from electronic waste: a review.** Journal of Hazardous Materials, v 158 , p 228-256, 2008.

CUNHA C. E. L., **Alvenaria – Arte e Técnica.** Universidade Mackenzie, MATEC III, 17/5/2010 - <http://pt.slideshare.net/Faumack/alvenaria-ecnica-e-arte> - Acessado em 20/7/2013.

D’AVILA E., **PDE- Programa para Desenvolvimento de Fabricantes** – ABCP-RJ – Concrete Show 2010 – Agosto de 2010.

DELFINI M., FERRINI M., MANNI A., MASSACCI P., PIGA L., SCOPPETTUOLO A. **Optimization of precious metal recovery from waste electrical and electronic equipment boards.** Journal of Environmental Protection, v 2, p 675-682, Ago. 2011.

DEIRO B., **Implantação de usina de reciclagem de lixo eletrônico em Sorocaba.** O Estado de São Paulo – 28/10/2012 – p. A 18.

DUAN H., HON K., LI J., ZHU X., **Examining the technology acceptance for dismantling e- waste printed circuit boards in light of recycling and environmental concerns.** Journal of Environmental Management. V 92, p 392-399, 2011.

ESPINHEIRA R.A.M., NASCIMENTO S.C.S, **Construção em alvenaria estrutural de bloco de concreto** – 2010 - http://info.ucsal.br/banmon/Arquivos/Mono3_0134.pdf - Consultado em 17- Julho - 2013.

EUROPEAN UNION – **Directive 2002/96 EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on waste electrical and electronic equipment (WEEE)** – Off.J. Eur. Union 2003, L37, p 24-38, 2003.

EUROPEAN UNION – **Directive of the European Parliament and of the Council on the restrictions of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment.** PE-CONS 62/10. Bruxelas, mar. 2011.

FERREIRA A.B.H. **Dicionário Aurélio Básico da Língua Portuguesa.** Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1988, 687 p.

FIORITI C.F., **Avaliação de compósitos de concreto com resíduos de borracha na produção de blocos para alvenaria.** 2002, 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista.

FRANCO J.M., **Produção de blocos de concreto para pavimentação (BCP) utilizando resíduos de galvanoplastia.** 2011 – 152 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana)– Departamento de Engenharia Civil – Centro de Tecnologia – Universidade Estadual de Maringá.

FREITAS JR. J.A., **Alvenaria Estrutural.** Apresentação em Power-Point: matéria Construção Civil II – TC-015 – 109 slides – Universidade Federal do Paraná – 2012.

FRÍAS C., LOZANO J.I., PALMA J., DÍAZ G., **Valorization of effluents from printed circuit boards manufacturing industry** – REWAS'04 – Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clear Technology- v III – p. 2635 – 2644 – 2004.

FURUUCHI M., YAMADA C., GOTOH K., **Shape separation of particulates by a rotating horizontal sieve drum.** Powder Technology, v 75, p 113-118, 1993.

GERBASE A.E., OLIVEIRA C.R., **Reciclagem do lixo de informática: uma oportunidade para a química**. Química Nova, vol. XY, p 1-7, abr. 2012.

GONÇALVES J.P., **Utilização de resíduos de corte de granito (RCG) como adição para produção de concreto**. 2000 – 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Escola de Engenharia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GOOSEY M., KELLNER R., **A scoping study end-of-life printed circuit boards**. Circuit World – v. 29 – iss. 3 – pp 33 – 37, 2003

GUO Jie, CAO B., GUO Jiuyong, Xu Z. **A Plate produced by nonmetallic materials of pulverized waste printed circuit boards**. Environmental Science & Technology, v42, p 5267-5271, 2008.

GUO Y., HUANG C.J., ZHANG H., DONG Q.X., **Heavy metal contamination from electronic waste recycling at Guiyu- Southeastern China**. Journal of Environmental Quality. V 38 – p 1617 – 1626 , 2009.

HOLANDA, O.G.J., **Blocos de concreto para alvenaria estrutural**. Anais Instituto Brasileiro do Concreto - 42^o Congresso Brasileiro de Concreto, Fortaleza – CE, 2000.

HUANG K., GUO J., XU Z. **Recycling of waste printed circuit boards: A review of current technologies and treatment status in China**. Journal of Hazardous Materials, v 164, p 399-408, 2009.

IZQUIERDO, I.S. **Uso de fibra natural de sisal em blocos de concreto para alvenaria estrutural**. 2011. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

IZQUIERDO O.S. **Influência do tipo de argamassamento e da utilização de peças de ajuste dimensional na resistência à compressão da alvenaria de blocos de concreto**. 2011. 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

ITABASHI I., **Gold use in electronics: bonding wire**. The LBMA Precious Metal Conference. Shanghai, 2004.

JANG Y. , **Waste electrical and electronic equipment (WEEE) management in Korea: generation, collection, and recycling systems.** Journal of Material Cycles Waste Management, v 12, p- 283-294, abr. 2010.

JUAHSZ A.L., **Brominated flame retardants: Cause of concern?**, Environmental Health Fund, 4 p, abr. 2010.

KASPER A.C. **Caracterização e reciclagem de materiais presentes em sucatas de telefones celulares.** 2011. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) Escola de Engenharia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

KAUFMAN L. **A green way to dump low-tech electronics.** NYTimes.com, 29, Junho, 2009 http://www.nytimes.com/2009/06/30/science/earth/30ewaste.html?pagewanted=all&_r=0 consultado em 25/4/2013.

KIDDEE P., RAVI N., WONG M.H., **Metals and polybrominated diphenyl ethers leaching from electronic waste in simulated landfills.** Journal of Hazardous Materials. v 252-253, p 243-249, 2013.

KIM Y., OSAKO M., SAKAI S., **Leaching characteristics of polybrominated diphenyl ethers (PBDE) from flame retardants plastics.** Chemosphere, Volume 65, Issue 3, pp 506-513, oct. 2006.

KNOP A., **Encapsulamento de solos contaminados por hidrocarbonetos.** 2003 – 80 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LADOU J., **Printed circuit board industry.** International Journal of Hygiene and Environmental Health, v 209, p 211-219, 2006.

LEE G.F., JONES-LEE A., **Electronic wastes and MSW landfill pollution of groundwater.** Reporte de G.Fred Lee & Associates, El Macero, set. 2009.

LEE J-C., KOYAMA K., TANAKA M., **Copper Recovery from Waste Printed Circuit Board,** Hydrometallurgy 2003-Fifth International Conference in Honor of Professor Ian M. Ritchie, Vol. 2: Electrometallurgy and Environmental Hydrometallurgy, p 1555-1563, 2003.

LEITE, P.R. **Logística reversa – A complexidade do retorno de produtos.** Revista Tecnológica- 3p. dez. 2009.

LEMOS J.L.S., CARLOS M.C., FARIAS Y.P.M.M., SANTOS R.L.C., **Revisão acerca da utilização de microrganismos na biorremediação de rejeitos industriais contendo metais pesados**. Série Tecnologia Ambiental, CETEM/MCT, 2008.

LEUNG A.O.W., DUZAGOREN-AYDIN N.S., CHEUNG K.C., WONG M.H., **Heavy metals concentrations of surface dust from e-waste recycling and its human health implications in Southwest China**. Environmental Science Technology, v 42, p 2674-2680, 2008

LI H.R., YU L.P., SHENG G.Y., FU J.M., PENG P.A., **Severe PCDD/F and PBDQ/F pollution in air and around an electronic waste dismantling area in China**. Environmental Science Technology, v 41, p 5641-5646, 2007.

LI J., ZHAO N., **Controlling transboundary movement of waste electrical and electronic equipment y developing international standards**. Environmental Engineering Science – v 27 - N 1, p. 3-11, 2010.

LIMA A.J.M., IWAKIN S., **Produtos alternativos na produção de blocos para alvenaria estrutural**. Floresta e Ambiente – v 18 (3) – p. 310-323 – jul./set. 2011.

LUBICK N., **Shifting mountains of electronic waste**. Environmental Health Perspectives. V. 120 (4), p. 148-149, abr. 2012.

LUDA M.P., **Recycling of printed circuit boards**. Integrated Waste Management, v II, p 285-296, ago. 2011.

LUO Q., CAI Z.W., WONG M.H., **Polybrominated diphenyl ethers in fish and sediment from river polluted by electronic waste**. Science of total environment. v 383, p 115-127, 2007.

MACHADO F.A.M., **Análise crítica do uso de um sistema racionalizado: o caso de alvenaria estrutural em blocos de concreto em edifícios habitacionais**. 2001, 25 p. Dissertação (Mestrado em Habitação). Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

MARIANO S.S., **Avaliação do efeito da substituição da areia por espumas rígidas pós-consumidas de poliuretano nas propriedades do concreto de cimento Portland**. 2009 – 75 p.- Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal do Paraná.

MEDEIROS E., RIOS M., **Fim dos lixões vira um sonho distante.** http://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/brasil/2013/05/04/interna_brasil,364252/pre_feitos-assumem-incapacidade-e-fim-dos-lixoes-vira-um-sonho-distante.shtml Correio

Braziliense – 4/5/2013. Acesso em 19/7/2013.

MESQUITA L.P., **Avaliação da fixação de metais pesados em matrizes cimentícias.** 2008 – 102 p - Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Universidade Federal de Santa Catarina.

MONTEVERDE F., **E-waste y su incorporación en la agenda gubernamental e internacional** - Los residuos electrónicos: Un desafío para la sociedad del conocimiento en America Latina y El Caribe – UNESCO – Montevideo, 2010.

MUSTAIN H.A., LOSTETLER A.B., BROWN W.D., **Evaluation of gold and aluminum wire bond performance for high temperature (500°C) silicon carbide (SiC) power modules.** Electronic Components and Technology Conference, Proceedings 55TH, v 2, pp 1623-1628, June, 2005.

NASCIMENTO NETO, J., **Investigação das solicitações de cisalhamento em edifícios de alvenaria estrutural submetidos a ações horizontais.** São Carlos, 1999. 127p Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

NUNES S.A., **Influência do uso de retardantes de chama halogenados e não halogenados em poliolefinas.** 2010 – 110 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) Centro Tecnológico – Universidade Federal de Santa Catarina.

OGUNNIYI I.O., VERMAAK M.K.G., GROOT D.R. **Chemical composition and liberation characterization of printed circuit board comminution fines for beneficiation investigation.** Waste Management – Artigo em Impressão – mar. 2009.

OLIVEIRA C.R., BERNARDES A.M., GERBASE A.E., **Collection and recycling of electronic scrap: a worldwide overview and comparison with the Brazilian situation.** Waste Management, v. 32, p. 1592-1610- 2012.

OLIVEIRA P.C., TABORDA F.C., MARGARIDO F., NOGUEIRA C.A., **Physical and chemical processing of printed circuit board waste** – World Recycling Forum – Nov. 10-13- 2012 – Shanghai.

PARSON D., **Printed circuit board recycling in Australia**. 5th Australian Conference on Life Cycle Assessment. Melbourne, nov. 2006.

PETTER P.M.H., BERNARDES A.M., VEIT H.M., BRITO D.O., **Estudo de lixivantes alternativos para extração de metais de placas de circuito impresso**. VII Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental. Porto Alegre, jun. 2012.

PINTO C.A., **Estudo da estabilização por solidificação de resíduos contendo metais pesados**. 2005 – 229 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) Escola Politécnica – Universidade de São Paulo.

PORTUGAL S.M., DANTÉS G.B. **Diagnóstico da geração de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE)**. 2010. Revista Resíduos em Referência. Vol 01 – p 16-21, dez. 2010.

PRADO M.I., **Eletrônicos: do lixo ao lucro. A escassez de matéria prima para a contínua comercialização de produtos eletrônicos e o peso para a reciclagem pós-consumo**. Universitas Gestão e TI. v 2, p 27-33, jan./jun. 2012.

PROTOMASTRO G.F., **El futuro de la industria del reciclado electrónico en Argentina- Los residuos electrónicos: Un desafío para la sociedad del conocimiento en America Latina y El Caribe – UNESCO – Montevideo, 2010.**

PRUDÊNCIO J.R., OLIVEIRA A.L., BEDIN C.A., **Alvenaria estrutural de blocos de concreto**. Florianópolis – Editora Gráfica Palloti, 2002.

PUCKETT J., **The digital dump: exporting re-use and abuse to África**. The Basel Action Network. 85 p, out. 2005.

RAYMOND M., **Electronic waste – E-Waste Backgrounder – Raymond Communications – 5p. – 2003.**

REZENDE S.M., **Materiais e dispositivos eletrônicos – São Paulo: Editora Livraria da Física - 2ª Edição –2004.**

ROBINSON B.H. **An assessment of global production and environmental impacts**. Science of the Total Environment. Canterbury, v408, p 183-191, out. 2009.

ROCHA A., MENDES P. **Evolução dos circuitos integrados.** <http://evolucaoic.com.sapo.pt/TrabalhoPraticoTICEvolCircuitosIntegrados.pdf> - Acesso em 20/1/2013.

RODRIGUES A.C., **Fluxo domiciliar de geração e destinação de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos no município de São Paulo- SP** – 2012 – 247 p. Tese (Doutorado em Saúde Ambiental) Faculdade de Saúde Pública – Universidade de São Paulo.

ROMAGNA R.H., **Resistência a compressão de prismas de blocos de concreto grauteados e não grauteados.** 2000 - 195 p Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina.

SALVADOR FILHO J.A.A., **Blocos de concreto para alvenaria em construções industrializadas.** 2007 – 246 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas)Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

SANAPALA R., **Characterization of FR-4 printed circuit board laminates before and after exposure to lead-free soldering conditions.** 2008 – 75 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Faculty of the Graduate School – University of Maryland.

SCHLUEP M., ROCHAT D., MUNYUA A., LAISSAOUI S.E., WONE S., KANE C., HIERONYMI K., **Assessing the e-waste situation in Africa.** Electronics Goes Green, 6 p., Berlim 8-10 set, 2008.

SCHMIDT C. W., **Unfair Trade: E-waste in Africa.** Environmental Health Perspectives. v 114, p A232-235, 2006.

SCHNOOR J.L. **Extended producer responsibility for e-waste** .Environmental Science & Technology. American Chemical Society, v46, p 7927-7927, jun. 2012.

SCHUMPETER J.A., **Capitalismo, socialismo e democracia.** 488 p. Editora Fundo de Cultura – Rio de Janeiro, 1961.

SILVA C.O., ROMANO M.G., **Entre para o bloco da qualidade.** Coleção Mão na Massa – Fascículo 7. ABCP – Associação Brasileira do Cimento Portland, 2008

SILVA C.R., **Papel do consumidor no descarte dos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos.** 2011. 43 p. Trabalho de graduação em Administração – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SLADE G., **Made to break: Technology and obsolescence in America**. First Harvard University Press – paperback edition, 2007, disponível parcialmente em : <http://www.amazon.com/Made-Break-Technology-Obsolescence-America/dp/0674025725> - Acesso em Agosto 2012.

SOUSA J.G.G., **Contribuição ao estudo da relação entre propriedades e proporcionamento de blocos de concreto – aplicação ao uso de entulho como agregado reciclado**. 2001. 137 p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) Faculdade de Tecnologia – Universidade de Brasília.

SPENCE R. D., SHI C., **Stabilization and solidification of hazardous, radioactive, and mixed wastes**. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, v 34, p 4-9, 2005.

SUM E.Y.L., **The recovery of metals from electronic scrap**. The Journal of Minerals, Metals and Materials Society, v 43 – p 53-61, 1991.

UNEP **Recycling – From E-Waste to Resources**. StEP – Solving the Waste Problem Berlin:UNU, Julho, 2009. 456 p.

US EPA – **Electronics waste management in United States – Approach 1 – Final**. Office of Solid State U.S. Environmental Protection Agency –jul. 2008.

USGS – U.S. Geological Survey , **Obsolete Computers, “Gold Mine”, or High-Tech Trash? Resources Recovery from Recycling**. – Fact Sheet FS 060-01 – U.S. Department of the Interior, July, 2001.

WALDMAN M., **Lixo eletrônico: resíduo novo e complexo**. Apresentado no II Forum Municipal do Lixo e Cidadania, Poços de Caldas, 2007.

WALSTON J.A., MILLER J.R., **Transistor Circuit Design**. McGraw-Hill Kogakusha Ltd – 1963.

WANG J.P., GUO X.K., **Impact of electronic wastes recycling on environmental quality**. Biomedical Environmental Sciences. v 19, p137-142, 2006.

WILES, C.C., **A review of solidification/stabilization technology**. Journal of Hazardous Materials, v 14 , issue 1, p 5-21, 1987.

WILLIAMS, P.T., HALL, W.J., **Processing waste printed circuit boards for material recovery.** Circuit World, Volume 33 – Number 4, 2007.

WONG C.S.C, WU S.C., DUZGOREN-AYDIN N.S., AYDIN A., WONG M.H., **Trace metal contamination of sediments in an e-waste processing village in China.** Environmental Pollution Science Direct. Hong Kong, v145, p 434-44, maio, 2006.

WONG M. H., LUO Q., CAI Z. W., **Polybrominated diphenyl ethers in fish and sediment from river polluted by electronic waste.** Science of Total Environment, v 383 – Issues 1-3, p 115-127, September, 2007.

YONEDA Y., NAKAMURA K., **Packing technology for image processing LSI.** Fujitsu Science and Technological Journal v.4 p. 138-144, jan. 2013.

ZHOU G., LUO Z., ZHAI X., **Experimental study on metal recycling from waste PCB.** Proceedings of the International Conference on Sustainable Solid Waste Management, Chennai, p 155-162, 5-7 set. 2007.

ZHOU X., GUO J., LIN K., HUANG K., DENG J., **Leaching characteristics of heavy metal and brominated flame retardants from waste printed circuit boards.** Journal of Hazardous Materials, vol. 246-247, p 96-102, jan. 2013.

APÊNDICE 1 – ANÁLISES ESTATÍSTICAS

A1.1- O teste ANOVA

A Análise de Variância (ANOVA) é um procedimento de cálculo estatístico utilizado para comparar ao mesmo tempo a média de três ou mais grupos, utilizando variáveis aleatórias contínuas. O teste é paramétrico, os grupos têm que ser independentes, e a variável de interesse deve ter distribuição normal. Também, é pressuposto que não existam diferenças significativas entre as variâncias dos vários grupos (IZQUIERDO I., 2011).

Para a execução de uma análise ANOVA deve-se ter uma variável de resposta contínua e ao menos um fator categórico com dois ou mais níveis. Em síntese, para a realização dos testes estatísticos é necessário primeiro estabelecer uma hipótese nula (H_0), ou hipótese de igualdade. Em seguida, estabelecer o nível de significância do teste utilizado, chamado fator alfa (α). Fixado o nível de significância do teste é possível determinar o valor crítico, que é um valor obtido na distribuição estatística considerada. Este valor vai separar a região crítica (de rejeição) da região de aceitação. O valor crítico é determinado considerando-se o nível de significância e o número de graus de liberdade das amostras comparadas. Se o valor da estatística estiver na região crítica, deve-se rejeitar a hipótese nula, caso contrário, aceitá-la. Admitiu-se neste trabalho, para a hipótese nula, a igualdade entre as médias ou entre as variáveis dos conjuntos de dados analisados, para um nível de significância de 5 %, ou seja, o valor de $\alpha = 0,05$. As análises foram realizadas utilizando-se o programa MiniTab 16.

A tomada de decisão é feita após comparar o valor de F observado com o valor de F crítico correspondente ao nível de significância adotado, sendo $F < F_{crit}$ a condição para a aceitação da hipótese de igualdade. Também são comparados o valor da probabilidade P associada ao nível de significância. Quanto menor o valor de P mais significativa é a diferença entre as amostras, ou seja, para a aceitação da hipótese nula, H_0 , o valor de P deve ser menor que o valor de α .

O programa MiniTab 16 permite a realização de comparações das médias através de três métodos: de Dunnet, de Turkey e de Fisher.

O método de Dunnet para comparações múltiplas cria intervalos de confiança entre as médias de nível de fator e a média do grupo de controle. Se um intervalo contém zero, então não há diferença significativa entre as médias dos dois grupos sob comparação.

O método de Turkey é utilizado na ANOVA para criar intervalos de confiança para todas as diferenças pareadas, entre as médias dos níveis de fatores enquanto controla a taxa de erro da família em um nível especificado. É importante considerar a taxa de erro da família de

dados quando se faz comparações múltiplas porque a chance de se cometer um erro do tipo I para uma série de comparações é maior do que a taxa de erro para qualquer comparação isolada.

O método de Fisher da menor diferença significativa cria intervalos de confiança para todas as diferenças pareadas entre as médias de nível de fator, enquanto controla a taxa de erro individual no nível especificado. O método de Fisher então utiliza a taxa de erro individual e um número de comparações para calcular o nível de confiança simultâneo para todos os intervalos de confiança. Este nível de confiança simultâneo é a probabilidade que todos os intervalos de confiança contenham a diferença verdadeira.

A seguir são apresentados os resultados da análise ANOVA considerando os três métodos de testes (Donnet, Turkey e Fisher), como apresentados pelo MiniTab, que na formulação dos resultados atribui letras iguais ou diferentes aos grupos (A, B e C) e descreve as relações entre eles. São apresentados também gráficos com os valores individuais dos grupos amostrados e o “boxplot” para cada grupo.

Uma tabela resume, para cada análise, os resultados das comparações dos valores de F com os valores F_{crit} , e os resultados dos valores de P com o fator α , que foi adotado como 0,05 em todos os testes (nível de significância de 5 %).

A1.2 - Teste ANOVA com um fator para os pesos dos blocos secos ao ar

One-way ANOVA: A – 0% B - 1,5% C - 2,0%

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	2	20,5070	0,2535	6,43	0,013
Error	120	4730	0,0394		
Total	140	9801			

S = 0,1985 R-Sq = 51,74% R-Sq(adj) = 43,69%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev	-----+-----+-----+-----+-----
A - 0%	5	10,232	0,235	(-----*-----)
B-1,5%	5	9,811	0,196	(-----*-----)
C-2,0%	5	9,883	0,157	(-----*-----)

-----+-----+-----+-----+-----

9,75 10,00 10,25 10,50

Pooled StDev = 0,199

Grouping Information Using Dunnett Method

Level	N	Mean	Grouping
A - 0% (control)	5	10,2320	A
C-2,0%	5	9,8830	
B-1,5%	5	9,8110	

Means not labeled with letter A are significantly different from control levelmean.

Dunnett's comparisons with a control

Family error rate = 0,05

Individual error rate = 0,0278

Critical value = 2,50

Control = A - 0%

Intervals for treatment mean minus control mean

Level	Lower	Center	Upper	
B-1,5%	-0,7352	-0,4210	-0,1068	(-----*-----)
C-2,0%	-0,6632	-0,3490	-0,0348	(-----*-----)

-----+-----+-----+-----+--
 -0,60 -0,40 -0,20 -0,00

Grouping Information Using Tukey Method

N	Mean	Grouping
A - 0%	5 10,2320	A
C-2,0%	5 9,8830	B
B-1,5%	5 9,8110	B

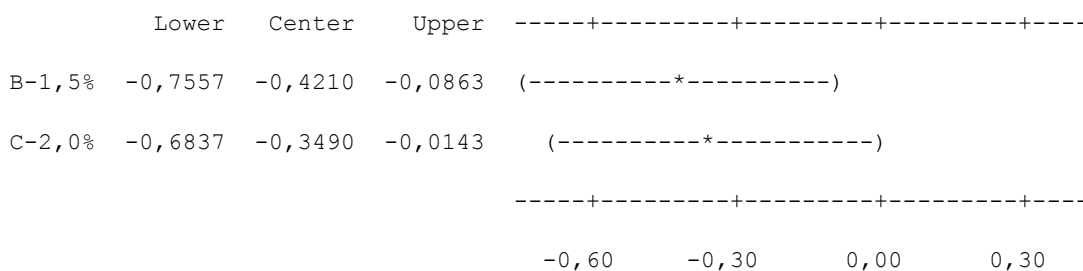
Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals

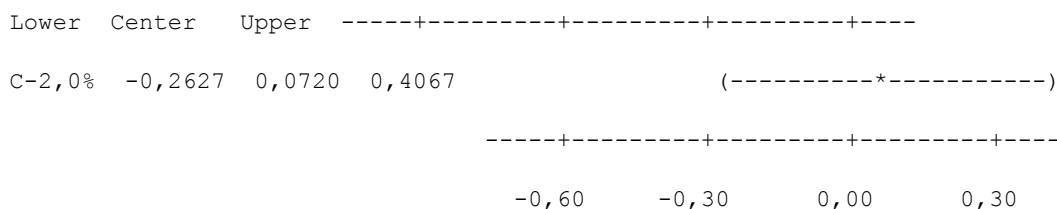
All Pairwise Comparisons

Individual confidence level = 97,94%

A - 0% subtracted from:



B-1,5% subtracted from:



Grouping Information Using Fisher Method

N	Mean	Grouping
A - 0%	5 10,2320	A
C-2,0%	5 9,8830	B
B-1,5%	5 9,8110	B

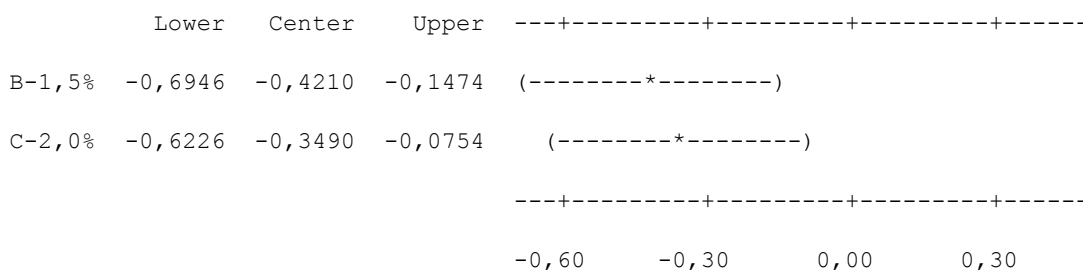
Means that do not share a letter are significantly different.

Fisher 95% Individual Confidence Intervals

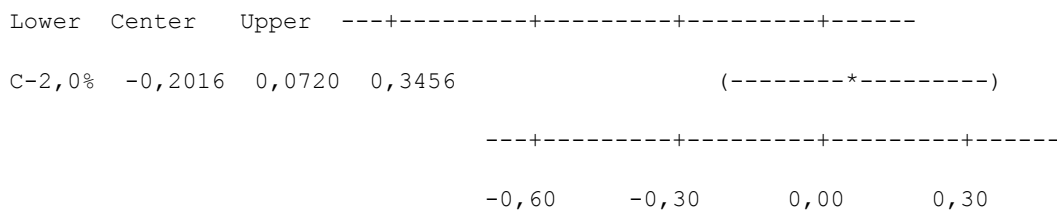
All Pairwise Comparisons

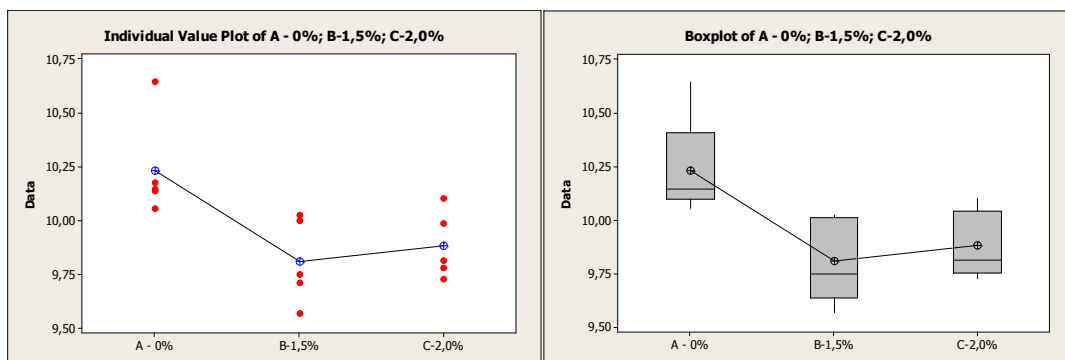
Simultaneous confidence level = 88,44%

A - 0% subtracted from:



B-1,5% subtracted from:





Análise:

F	Teste	F _{crit}	valor P	Teste	Nível de Significância
6,43	Maior	2,50	0,013	Menor	0,05

Como $P < 0,05$ e $F > F_{CRIT}$ devemos rejeitar a hipótese nula H_0 , assumindo que para um nível de significância de 0,05 os pesos dos blocos das séries com e sem adição de resíduos, são diferentes. Os testes de Dunnett, Turkey e Fischer apresentam os mesmos resultados, indicando que o lote A é significativamente diferente dos lotes B e C, os quais não apresentam diferenças significativas entre si.

A1.3 – Teste ANOVA com um fator para o teor de umidade dos blocos.

One-way ANOVA: A– 0% B-1,5% C-2,0%

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor		227,15	13,57	1,82	0,242
Error		644,85	7,47		
Total		872,00			

S = 2,734 R-Sq = 37,71% R-Sq(adj) = 16,94%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev	CI
A- 0%	3	13,013	1,787	(-----*-----)
B-1,5%	3	9,577	3,239	(-----*-----)
C-2,0%	3	9,123	2,956	(-----*-----)

-----+-----+-----+-----
6,0 9,0 12,0 15,0

Pooled StDev = 2,734

Grouping Information Using Dunnett Method

Level	N	Mean	Grouping
A- 0% (control)	3	13,013	A
B-1,5%	3	9,577	A
C-2,0%	3	9,123	A

Means not labeled with letter A are significantly different from control levelmean.

Dunnett's comparisons with a control

Family error rate = 0,05

Individual error rate = 0,0287

Critical value = 2,86

Control = A- 0%

Intervals for treatment mean minus control mean

Level	Lower	Center	Upper	
B-1,5%	-9,827	-3,437	2,954	(-----*-----)
C-2,0%	-10,281	-3,890	2,501	(-----*-----)

-----+-----+-----+-----+

-7,0 -3,5 0,0 3,5

Grouping Information Using Tukey Method

	N	Mean	Grouping
A- 0%	3	13,013	A
B-1,5%	3	9,577	A
C-2,0%	3	9,123	A

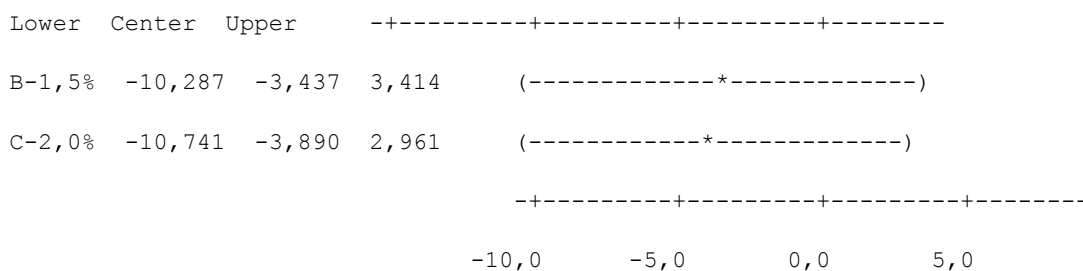
Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals

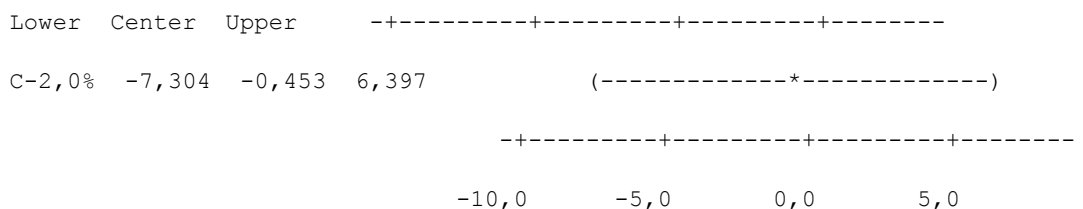
All Pairwise Comparisons

Individual confidence level = 97,80%

A- 0% subtracted from:



B-1,5% subtracted from:



Grouping Information Using Fisher Method

	N	Mean	Grouping
A- 0%	3	13,013	A
B-1,5%	3	9,577	A
C-2,0%	3	9,123	A

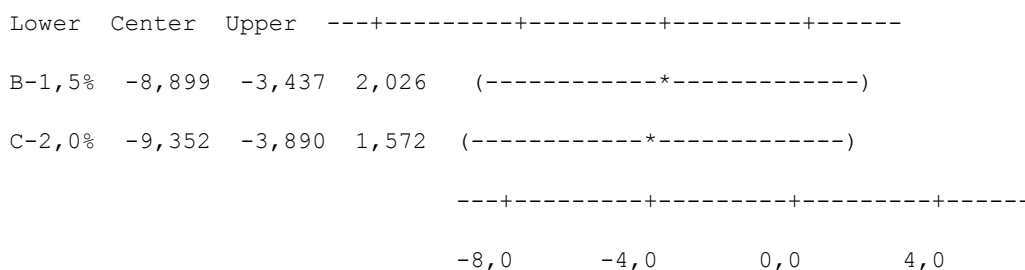
Means that do not share a letter are significantly different.

Fisher 95% Individual Confidence Intervals

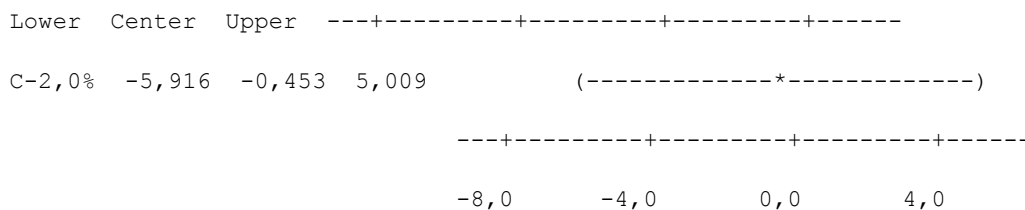
All Pairwise Comparisons

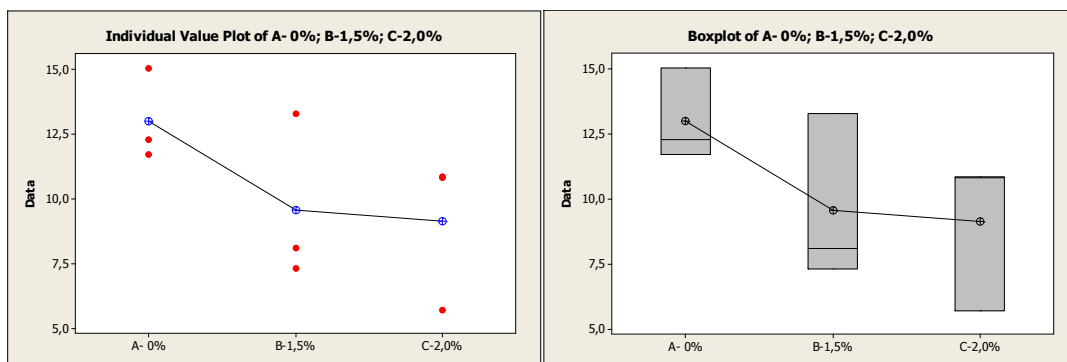
Simultaneous confidence level = 89,08%

A- 0% subtracted from:



B-1,5% subtracted from:





Análise:

F	Teste	F _{crit}	valor P	Teste	Nível de Significância
1,82	Menor	2,86	0,242	Maior	0,05

Temos para o teor de umidade dos blocos que $F < F_{CRIT}$ $P > 0,05$, o que nos leva a concluir que para um nível de significância de 0,05 não podemos rejeitar a hipótese nula H_0 , ou seja, que os teores de umidade das séries de blocos com e sem resíduos não são diferentes entre si.

A1.4 – Teste ANOVA com um fator para índice de absorção de água dos blocos.

One-way ANOVA: A – 0% B - 1,5 % C - 2,0 %

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor		28,3421	4,1710	52,04	0,000
Error	60,4809	0,0802			
Total	88,8230				

S = 0,2831 R-Sq = 94,55% R-Sq(adj) = 92,73%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev	-----+-----+-----+-----
A - 0%	3	5,8033	0,3239	(----*----)
B - 1,5 %	3	8,1600	0,3051	(----*----)
C - 2,0 %	3	7,0567	0,2060	(----*----)

-----+-----+-----+-----

5,60 6,40 7,20 8,00

Pooled StDev = 0,2831

Grouping Information Using Dunnett Method

Level	N	Mean	Grouping
A - 0% (control)	3	5,8033	A
B - 1,5 %	3	8,1600	
C - 2,0 %	3	7,0567	

Means not labeled with letter A are significantly different from control levelmean.

Dunnett's comparisons with a control

Family error rate = 0,05

Individual error rate = 0,0287

Critical value = 2,86

Control = A - 0%

Intervals for treatment mean minus control mean

Level	Lower	Center	Upper	
B - 1,5 %	1,6949	2,3567	3,0185	(-----*-----)
C - 2,0 %	0,5915	1,2533	1,9151	(-----*-----)

-----+-----+-----+-----

0,70 1,40 2,10 2,80

Grouping Information Using Tukey Method

	N	Mean	Grouping
B - 1,5 %	3	8,1600	A
C - 2,0 %	3	7,0567	B
A - 0%	3	5,8033	C

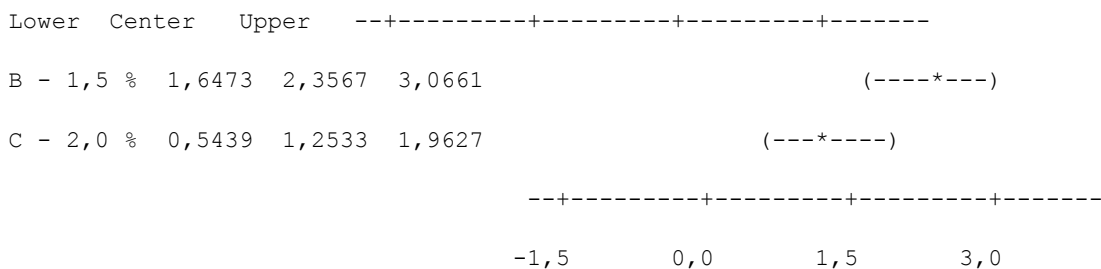
Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals

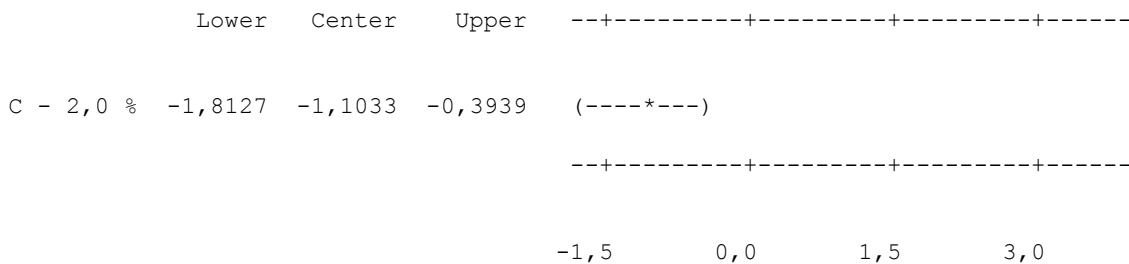
All Pairwise Comparisons

Individual confidence level = 97,80%

A - 0% subtracted from:



B - 1,5 % subtracted from:



Grouping Information Using Fisher Method

	N	Mean	Grouping
B - 1,5 %	3	8,1600	A
C - 2,0 %	3	7,0567	B
A - 0%	3	5,8033	C

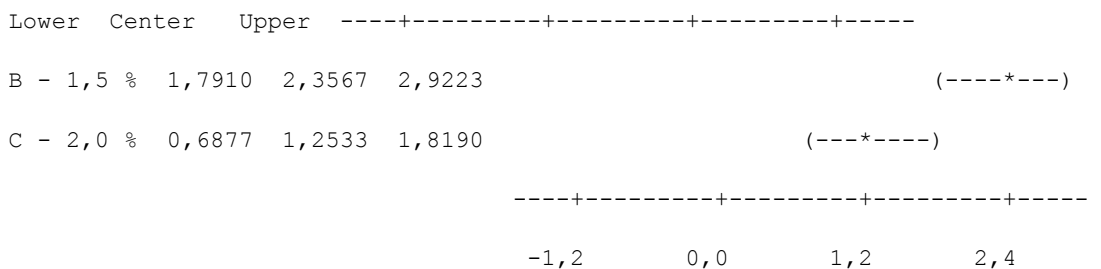
Means that do not share a letter are significantly different.

Fisher 95% Individual Confidence Intervals

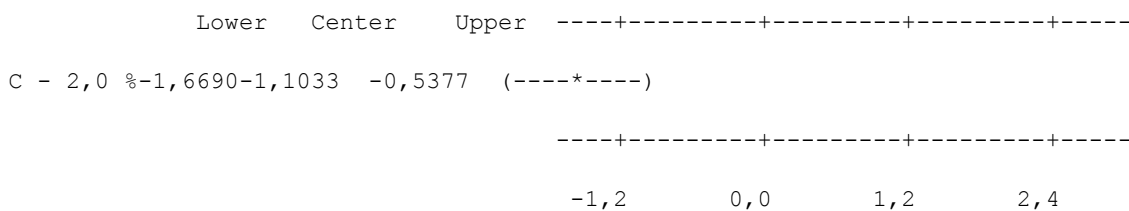
All Pairwise Comparisons

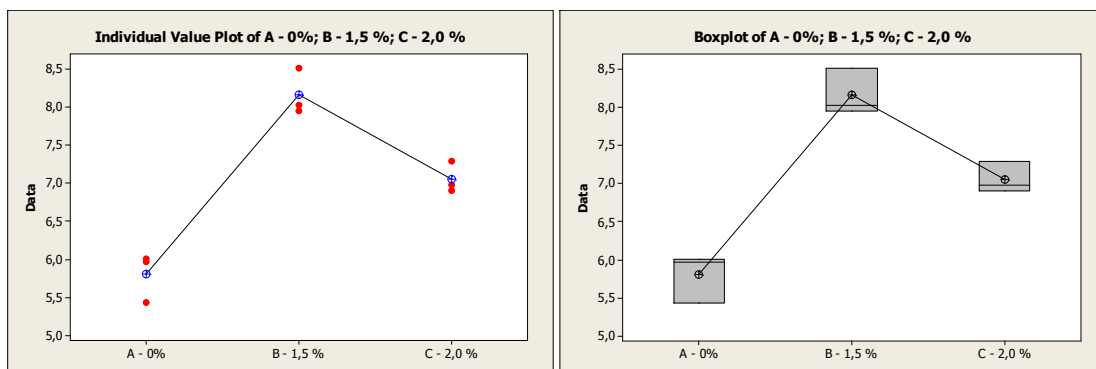
Simultaneous confidence level = 89,08%

A - 0% subtracted from:



B - 1,5 % subtracted from:





Análise:

F	Teste	F _{crit}	Valor P	Teste	Nível de Significância
52,04	Maior	2,86	0,000	Menor	0,05

Neste ensaio temos $F > F_{CRIE}$ e $P < 0,05$, resultando na rejeição da hipótese nula e assumindo que os blocos das diferentes séries, com e sem resíduos, apresentam resultados diferentes para o ensaio do índice de absorção de água.

A1.5 – Teste ANOVA com um fator para a resistência à compressão dos blocos.

One-way ANOVA: A- 0 % B - 1,5 % C - 2,0 %

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor		275,501	37,751	68,93	0,000
Error	158,215	0,548			
Total	1783,716				

S = 0,7400 R-Sq = 90,19% R-Sq(adj) = 88,88%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev	+-----+-----+-----+-----
A- 0 %	6	10,383	1,085	(---*---)
B - 1,5 %	6	7,867	0,151	(---*---)
C - 2,0 %	6	5,367	0,665	(---*---)
				+-----+-----+-----+-----
				4,8 6,4 8,0 9,6

Pooled StDev = 0,740

Grouping Information Using Dunnett Method

Level	N	Mean	Grouping
-------	---	------	----------

```

A- 0 % (control)  6  10,3833  A
B - 1,5 %         6   7,8667
C - 2,0 %         6   5,3667

```

Means not labeled with letter A are significantly different from control levelmean.

Dunnett's comparisons with a control

Family error rate = 0,05

Individual error rate = 0,0276

Critical value = 2,44

Control = A- 0 %

Intervals for treatment mean minus control mean

Level	Lower	Center	Upper
B - 1,5 %	-3,5589	-2,5167	-1,4744
C - 2,0 %	-6,0589	-5,0167	-3,9744

```

Level          +-----+-----+-----+-----+
B - 1,5 %          (-----*-----)
C - 2,0 %          (-----*-----)
          +-----+-----+-----+-----+
          -6,0      -4,8      -3,6      -2,4

```

Grouping Information Using Tukey Method

	N	Mean	Grouping
A- 0 %	6	10,3833	A
B - 1,5 %	6	7,8667	B
C - 2,0 %	6	5,3667	C

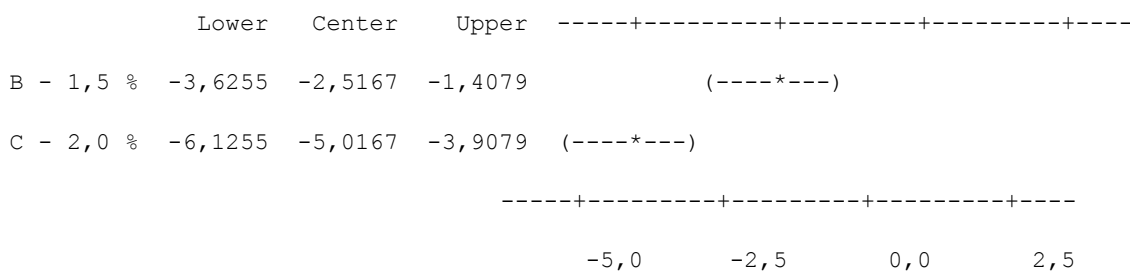
Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals

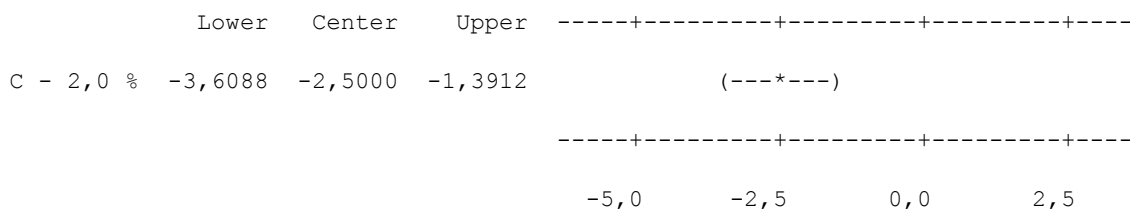
All Pairwise Comparisons

Individual confidence level = 97,97%

A- 0 % subtracted from:



B - 1,5 % subtracted from:



Grouping Information Using Fisher Method

	N	Mean	Grouping
A- 0 %	6	10,3833	A
B - 1,5 %	6	7,8667	B
C - 2,0 %	6	5,3667	C

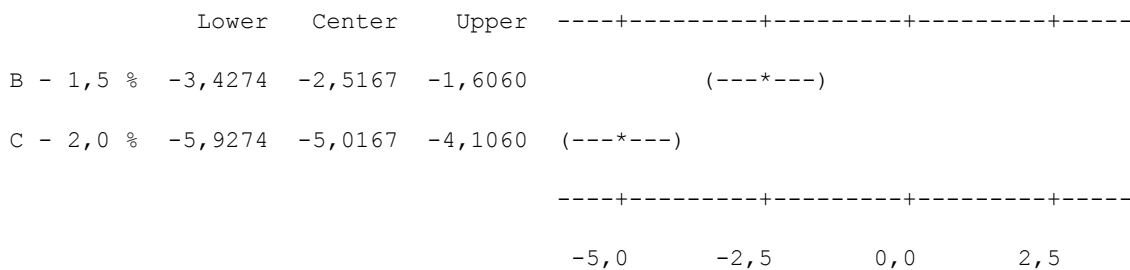
Means that do not share a letter are significantly different.

Fisher 95% Individual Confidence Intervals

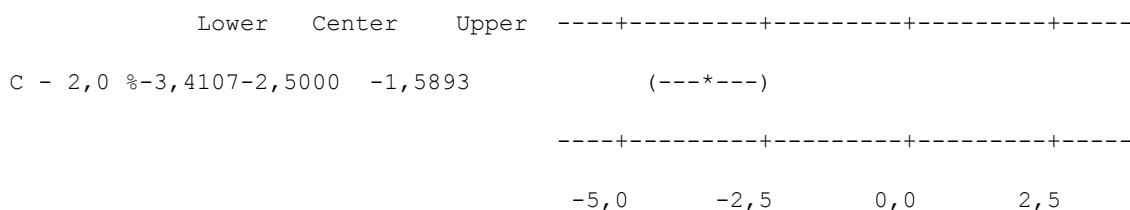
All Pairwise Comparisons

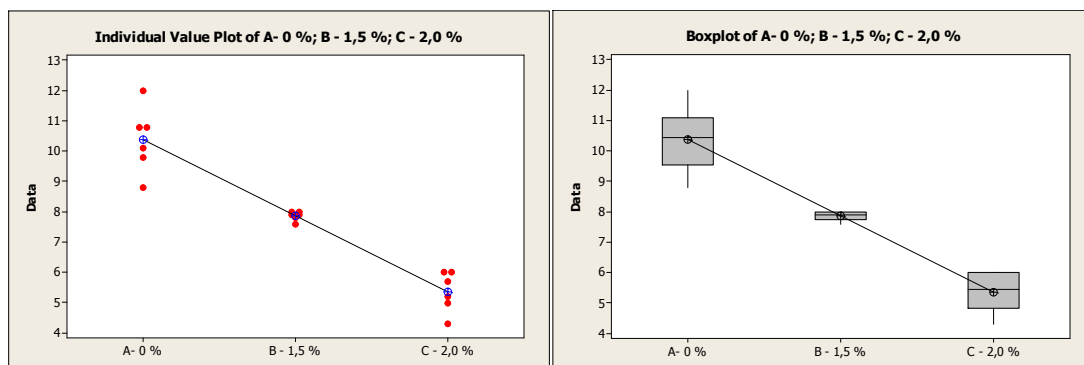
Simultaneous confidence level = 88,31%

A- 0 % subtracted from:



B - 1,5 % subtracted from:





Análise:

F	Teste	F _{crit}	valor P	Teste	Nível de Significância
68,93	Maior	2,44	0,000	Menor	0,05

Neste ensaio temos $F > F_{CRIT}$ e $P < 0,05$, resultando na rejeição da hipótese nula e assumindo que os blocos das diferentes séries, com e sem resíduos, apresentam resistência à compressão diferentes.

APÊNDICE 2 – TABELAS DOS RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS ENSAIOS

Tabela A.1: Ensaio dimensionais dos blocos tipo A – 0 % de resíduos.

Bloco	Largura	Comprimento	Altura	Parede Longitudinal	Parede Transversal	Menor dimensão dos furos
1	91,2	393,6	188,8	23,3	22,5	45,0
2	92,1	393,4	193,1	23,2	22,2	44,5
3	91,5	393,3	187,2	22,4	21,4	46,7
4	92,2	394,1	190,3	21,3	22,0	45,1
5	90,6	393,5	189,9	20,4	22,4	45,8
6	91,8	393,9	187,7	21,2	21,9	45,0
Média	91,57	393,63	189,50	21,97	22,07	45,35
Desvio Padrão	0,60	0,31	2,13	1,18	0,40	0,78
Variância	0,36	0,09	4,56	1,39	0,16	0,61

Tabela A.2: Ensaio dimensionais dos blocos tipo B – 1,5 % de resíduos.

Bloco	Largura	Comprimento	Altura	Parede Longitudinal	Parede Transversal	Menor dimensão dos furos
1	91,6	394,6	189,9	23,3	23,1	48,1
2	93,6	394,8	187,1	24,5	22,9	45,6
3	90,8	394,4	187,6	22,6	23,3	48,6
4	90,8	394,4	188	21,9	23	47
5	90,3	394	189,5	23,2	22,6	45,7
6	91,3	393,9	189,8	22,4	21,8	45,9
Média	91,40	394,35	188,65	22,98	22,78	46,82
Desvio Padrão	1,17	0,34	1,23	0,91	0,53	1,30
Variância	1,36	0,12	1,51	0,82	0,29	1,69

Tabela A.3: Ensaio dimensionais dos blocos tipo C – 2,0 % de resíduos.

Bloco	Largura	Comprimento	Altura	Parede Longitudinal	Parede Transversal	Menor dimensão dos furos
1	91,4	393,9	188,6	23,1	21,8	46,8
2	90,8	394,2	187,1	23,5	21,9	46,7
3	90,8	393,7	190,6	22,2	23,3	46,1
4	92,4	394,1	189,2	22,6	24,1	46,9
5	90,9	394,1	189,4	23,3	21,8	47,8
6	91,3	393,6	191,6	23,1	21,6	46
Média	91,27	393,93	189,42	22,97	22,42	46,72
Desvio Padrão	0,61	0,24	1,57	0,48	1,03	0,65
Variância	0,37	0,06	2,45	0,23	1,06	0,42

Tabela A.4: Ensaios de ruptura sob compressão dos blocos tipo A – 0 % de resíduos.

Bloco A – 0 %			
Bloco	Pressão de ruptura (MPa)	Cálculo estatístico	Resultado
1	12,0	Soma Σ	62,3MPa
2	9,8	Média μ	10,38 MPa
3	10,1	Desvio Padrão σ	1,085
4	8,8	Variância σ^2	1,177
5	10,8	Coefficiente de Variação C.V.	10,45%
6	10,8	Resistência Característica f_{bk}	8,5MPa

Tabela A.5: Ensaios de ruptura sob compressão dos blocos tipo B – 1,5 % de resíduos.

Bloco B – 1,5 %			
Bloco	Pressão de ruptura (MPa)	Cálculo estatístico	Resultado
1	8,0	Soma Σ	46,4MPa
2	7,6	Média μ	7,73MPa
3	7,8	Desvio Padrão σ	0,294
4	7,9	Variância σ^2	0,086
5	7,9	Coefficiente de Variação C.V.	3,80%
6	8,0	Resistência Característica f_{bk}	7,0MPa

Tabela A.6: Ensaios de ruptura sob compressão dos blocos tipo C – 2,0 % de resíduos.

Bloco C – 2,0 %			
Bloco	Pressão de ruptura (MPa)	Cálculo estatístico	Resultado
1	4,3	Soma Σ	31,0MPa
2	5,2	Média μ	5,16MPa
3	5,7	Desvio Padrão σ	0,615
4	6,0	Variância σ^2	0,378
5	5,0	Coefficiente de Variação C.V.	11,91 %
6	6,0	Resistência Característica f_{bk}	4,1MPa

Tabela A.7: Massa dos blocos secos em estufa – M1.

Bloco	Pesagem 1	Pesagem 2	(P1-P2) %	Pesagem 3	(P2-P3)%
	gramas	gramas	%	gramas	%
Bloco 1 – 0%	10.403,4	10.401,8	0,02	10.400,4	0,01
Bloco 2 – 0%	10.017,0	10.016,6	0,00	10.016,7	0,00
Bloco 3 – 0%	9.851,0	9.851,2	0,00	9.852,6	-0,01
Bloco 1 – 1,5%	9.574,8	9.574,8	0,00	9.573,0	0,02
Bloco 2 – 1,5%	9.327,0	9.320,0	0,08	9.322,6	-0,03
Bloco 3 – 1,5%	9.614,8	9.615,0	0,00	9.616,2	-0,01
Bloco 1 – 2%	9.812,0	9.811,6	0,00	9.811,4	0,00
Bloco 2 – 2%	9.656,0	9.657,0	-0,01	9.656,6	0,00
Bloco 3 – 2%	9.747,2	9.747,7	-0,01	9.747,6	0,00

Tabela A.8: Massa dos blocos saturados de água – M2

Bloco	Pesagem 1	Pesagem 2	(P2-P1) %	Pesagem 3	(P3-P2)%
	gramas	gramas	%	gramas	%
Bloco 1 – 0%	10.963,7	10.960,0	-0,03	10.965,2	-0,05
Bloco 2 – 0%	10.604,4	10.615,3	0,10	10.615,1	0,00
Bloco 3 – 0%	10.427,9	10.440,1	0,12	10.444,4	-0,04
Bloco 1 – 1,5%	10.329,4	10.339,0	0,09	10.340,6	-0,02
Bloco 2 – 1,5%	10.106,4	10.108,5	0,02	10.115,7	-0,07
Bloco 3 – 1,5%	10.337,7	10.383,8	0,44	10.380,6	0,03
Bloco 1 – 2%	10.500,4	10.488,3	-0,12	10.488,4	0,00
Bloco 2 – 2%	10.360,2	10.368,8	0,08	10.360,3	0,08
Bloco 3 – 2%	10.423,0	10.418,2	-0,05	10.427,7	-0,09

Tabela A.9: Massa dos blocos secos ao ar – M3.

Bloco	Pesagem 1
	gramas
Bloco 1 – 0%	10.485,4
Bloco 2 – 0%	10.090,2
Bloco 3 – 0%	9.921,9
Bloco 1 – 1,5%	9.675,0
Bloco 2 – 1,5%	9.380,7
Bloco 3 – 1,5%	9.678,2
Bloco 1 – 2%	9.884,6
Bloco 2 – 2%	9.696,8
Bloco 3 – 2%	9.821,4

Tabela A.10: Massa aparente dos blocos (imersos em água) – M4.

Bloco	Pesagem 1
	gramas
Bloco 1 – 0%	6.145,2
Bloco 2 – 0%	6.460,6
Bloco 3 – 0%	6.131,8
Bloco 1 – 1,5%	5.785,6
Bloco 2 – 1,5%	5.642,9
Bloco 3 – 1,5%	5.829,3
Bloco 1 – 2%	5.872,1
Bloco 2 – 2%	5.832,1
Bloco 3 – 2%	5.836,8