

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais - POSMAT

Luciane Lopes Rodrigues

**CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS DESCARTADOS DE REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE ELETRICIDADE PARA FINS DE RECICLAGEM**

SOROCABA

2010

Luciane Lopes Rodrigues

**CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS DESCARTADOS DE REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE ELETRICIDADE PARA FINS DE RECICLAGEM**

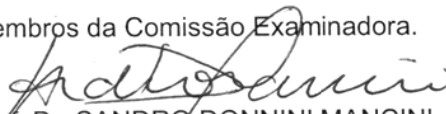
Dissertação apresentada como requisito à obtenção do título de Mestre à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, área de concentração em Materiais Poliméricos, Cerâmicos, Híbridos e Nano Estruturais, sob a orientação do Prof. Dr. Sandro Donnini Mancini.

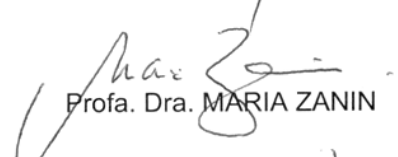
SOROCABA

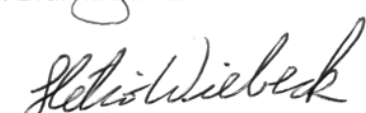
2010

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE LUCIANE LOPES RODRIGUES, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS, DO(A) FACULDADE DE CIÊNCIAS DE BAURU.

Aos 17 dias do mês de agosto do ano de 2010, às 09:00 horas, no(a) Sala 03 - UNESP - Sorocaba, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. SANDRO DONNINI MANCINI do(a) Campus Experimental - UNESP - Sorocaba, Profa. Dra. MARIA ZANIN do(a) Incoop/Ufscar / Universidade Federal de São Carlos, Prof. Dr. HELIO WIEBECK do(a) Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais / Universidade de São Paulo, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de LUCIANE LOPES RODRIGUES, intitulada "CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS DESCARTADOS DAS REDES ELÉTRICAS PARA FINS DE RECICLAGEM". Após a exposição, a discente foi argüida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADA . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

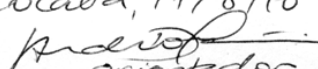

Prof. Dr. SANDRO DONNINI MANCINI


Profa. Dra. MARIA ZANIN


Prof. Dr. HELIO WIEBECK

NOVO TÍTULO:

CARACTERIZAÇÃO DE ~~DE~~ MATERIAIS DESCARTADOS DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ELETRICIDADE PARA FINS DE RECICLAGEM.

Sorocaba, 17/8/10

orientador

Dedico este trabalho ao meu filho Pedro, que participou dos trabalhos em campo ainda na barriga, e é um dos meus maiores motivadores.

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial a minha mãe, por toda a ajuda e carinho infinito.

Ao Marcus, meu companheiro de todas as horas, por compartilhar os sonhos.

Ao meu irmão Reginaldo e a prima Marilza, por todo o incentivo que sempre me deram.

Ao meu orientador Prof. Dr. Sandro Donnini Mancini pela acolhida, atenção, companheirismo e conhecimentos compartilhados durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do Laptec pelo apoio e ensinamentos valiosos.

Às alunas de iniciação científica, em especial à Camila Franco, Juliane Ziviani,

Natália Nogueira, Gabriela Antoniol, Raquel Montognoli e Mariana Favero.

Aos companheiros de pós e amigos Sabrina, Rita e Antídio pela ajuda sempre prestativa, e em especial ao Bruno Gianelli, pesquisador do projeto com a AES Eletropaulo.

Ao Eduardo Murbach e Gilvan Júnior da Silva, funcionários da INA/Schaeffler.

Às Gerentes Silma Carmelo e Sonia Hermsdorff, ao Leandro Forti, ao André Alves e em especial ao Vladimir Xavier pela acolhida na AES Eletropaulo.

À AES Eletropaulo pelo financiamento.

Ao Prof. Dr. Haroldo Lhou Hasegawa pela ajuda em relação aos materiais cerâmicos.

À equipe da Amara e em especial ao funcionário João Milanezi Neto.

RODRIGUES, L. L. **Caracterização de Materiais Descartados de Redes de Distribuição de Eletricidade para fins de Reciclagem.** 2010. 131f. Dissertação (Mestre em Ciência e Tecnologia de Materiais) – UNESP, Campus de Sorocaba, 2010.

RESUMO

Uma empresa que atua no setor de subtransmissão, transformação e distribuição de eletricidade gera grandes quantidades de resíduos sólidos com a instalação, manutenção e reforma das suas redes elétricas. A destinação correta desses resíduos acarreta num custo associado para a empresa e preocupações concernentes à saúde pública. Através de pesquisa realizada em artigos científicos nacionais e internacionais verificou-se que existem muitos estudos sobre REEEs, porém não se encontrou estudo específico sobre os resíduos de redes de transmissão e distribuição de eletricidade. O objetivo deste trabalho foi realizar uma caracterização dos resíduos gerados, bem como estudos pontuais sobre alguns de modo a apontar procedimentos que visem a diminuição da geração e/ou a sua valorização enquanto sucata. Por exemplo, em 2009 o alumínio recoberto por polímero foi vendido por R\$2,57/kg, já o nu por R\$4,38/kg, de modo que a sua separação do polímero poderia gerar uma receita de no mínimo 10% superior à obtida atualmente. Da separação do item “plásticos”, que foi comercializado por R\$0,06/kg, poderiam ser obtidas receitas da venda de polímeros valorizados no mercado de reciclagem, como o PET, policarbonato, PVC, polietileno. Para uma diminuição da geração de resíduos de equipamentos de proteção individual (EPIs) poderia haver a implementação de um padrão para evitar o descarte de produtos que ainda podem ser considerados em “bom estado”. Foram escolhidos 3 resíduos para um estudo mais aprofundado sobre potencial de reciclagem a partir da comparação de propriedades físico-químicas destes com materiais semelhantes antes do uso: isoladores poliméricos, isoladores de porcelana e abraçadeira ferrosa. O polímero do isolador foi identificado por ensaios de queima/fumaça, de espectroscopia no infravermelho e raios-X via microscopia eletrônica de

varredura como o elastômero de silicone. Através dos ensaios de densidade, termogravimetria e calorimetria de varredura diferencial verificou-se que pode ter havido algum processo de degradação do elastômero durante o uso, o que torna a reciclagem (a despeito das dificuldades de fazê-lo com este material) a única opção deste resíduo sem considerar o descarte. Os ensaios realizados no material cerâmico novo e usado foram em geral muito próximos, apontando para a possibilidade de seu aproveitamento como chamote (agregado, por exemplo, em materiais de construção civil), independente da cor do esmalte. Já a espectrofotometria de emissão ótica por centelha realizada em amostras de abraçadeiras metálicas indicou tratar-se de um aço carbono, enquanto a microscopia eletrônica de varredura apontou a presença de revestimento de zinco nas novas e perda parcial do mesmo nas usadas. Uma nova galvanização pode tornar o produto apto a reutilização, uma vez que os resultados analíticos dos ensaios realizados não indicaram perda da qualidade do material após o uso.

Palavras-chave: Resíduos elétricos; Caracterização; Reciclagem; Redes Elétricas.

ABSTRACT

A company that operates in the sector of sub-transmission, transformation and distribution of electricity generates great amounts of solid residues with the installation, maintenance and repair of your electric lines. The correct disposal of this residues generates a associated cost to the company and concerns about public health. It was verified through a survey done in national and international scientific articles that there are many studies about WEEEs, but a specific study about residues of transmission and distribution electricity lines wasn't found. The objective of this work was to carry out a characterization of the residues generated, to execute specific studies on some residues to indicate procedures that aim at the reduction of the generation and/or the valorization of the scrap materials. In 2009, for instance, aluminum covered by polymer was sold at R\$2.57/kg, while naked aluminum is sold at R\$4.38/kg. Separation of the polymer would generate a gain of at least 10% above that of the current procedure. By separation of the "plastic" items, which were sold at R\$0,06/kg, gains in polymer sales could obtained by recycling such materials as PET, polycarbonate, PVC and polyethylene. A suggestion for the reduction in the generation of waste derived from personal protective equipment would be to implement a standard to avoid discarding products considered in "good condition". Three residues had been chosen for a more in-depth study about the potential for recycling, comparing their physical and chemical properties with similar materials before usage: polymeric insulators, porcelain insulators and ferrous cramp. The insulator polymer was identified by incinerating assay, infrared spectroscopy and X-rays by scanning electron microscopy as silicon elastomer. Through density, thermogravimetry and differential scanning calorimetry it was verified that some degradation could have occurred during use of polymeric insulator, making the recycling process (despite difficulties in applying it to this material) the only option for this residue, apart from its disposal. In general, assays performed in new and used ceramic material provided very similar results,

indicating the possibility of its utilization as grog (as an aggregate in building materials, for instance), regardless of color enamel. Spark optical emission spectrometry performed in metallic cramp samples indicated its material as being carbon steel, while scanning electron microscopy indicated the presence of zinc coating in unused samples and its partial loss in used samples. A new process of electro-deposition can make the product adequate for reusing, since analytical results of performed assays didn't indicate loss of quality of the material after its use.

Key words: Electrical residues; Characterization; Recycling; Electrical Lines.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Poste de concreto armado com cruzeta de madeira sustentando seis isoladores cerâmicos tipo castanha	10
Figura 2 – Fotografia de uma abraçadeira para poste de eletricidade (Fonte: www.eletrotrafo.com)	10
Figura 3 – Isoladores em porcelana: (a) chave faca, (b) chave fusível e (c) para-raio (Fonte: www.drsul.com)	16
Figura 4 – Esquema de sinterização de partículas, processo típico na fabricação de materiais cerâmicos (KINGERY, BOWEN & UHLMANN, 1976)	17
Figura 5 – Ângulo de contato (RANGEL, GADIOLI & CRUZ, 2004)	24
Figura 6 – Forças que atuam nas espécies no interior e na superfície de um material (RANGEL, GADIOLI & CRUZ, 2004).	25
Figura 7 – (a) Gaiola contendo isolador de porcelana ou vidro com ferragem e (b) gaiola contendo chave faca, chave fusível e para-raio	40
Figura 8 – (a) Fios e cabos de alumínio com isolamento e (b) fios e cabos nu de alumínio sem alma de aço	40
Figura 9 – (a) Fios e cabos nu de cobre e (b) cabo nu de alumínio com alma de aço	40
Figura 10 – Fluxograma da caracterização realizada	42
Figura 11 - Fluxograma dos ensaios realizados com a porcelana dos isoladores, onde MEV/EDS corresponde à microscopia eletrônica de varredura acoplada a espectroscopia de energia dispersiva	44
Figura 12 - Fluxograma dos ensaios realizados com o elastômero das abas dos isoladores poliméricos, onde FTIR corresponde à espectrofotometria de infravermelho por transformada de Fourier, MEV/EDS à microscopia eletrônica de varredura acoplada a espectroscopia de energia dispersiva, TGA à análise termogravimétrica e DSC à calorimetria de varredura diferencial	44
Figura 13 - Fluxograma dos ensaios realizados com o metal das abraçadeiras, onde MEV/EDS corresponde à microscopia eletrônica de varredura acoplada a espectroscopia de energia dispersiva	45
Figura 14 – Balança analítica com suporte estacionário para o recipiente de imersão utilizada no ensaio	47
Figura 15 – Amostra sendo pressionada contra a superfície do cristal	54
Figura 16 - Exemplos de resíduos ferrosos gerados pela empresa	64
Figura 17 – Composição percentual dos resíduos sólidos gerados pela empresa em 2009	67
Figura 18 – Isoladores tipo pilar feitos de porcelana cinza, porcelana marrom e de vidro	68
Figura 19 – Isoladores de discos feitos de vidro e de porcelana marrom	68
Figura 20 – Isoladores de porcelana marrom: (a) tipo cruzeta com pino de madeira, (b) tipo roldana e (c) tipo castanha	69
Figura 21 – Isoladores tipo bastão: (a) de cerâmica cinza, (b) de polímero	69
Figura 22 – Chaves cuja parte isoladora é feita de porcelana cinza: (a) faca, (b) fusível	69
Figura 23 – Exemplos de para-raios encontrados: (a) parte isoladora feita de porcelana marrom, (b) parte isoladora feita de porcelana cinza, (c) parte isoladora feita de polímero	70

Figura 24 – Para-raio de porcelana marrom (tipo 2 da Tabela 5) antes e após a sua quebra	70
Figura 25 – Quantidade em kg e percentual relativo médio em % (p/p) dos materiais componentes das chaves faca, fusível e para-raios	76
Figura 26 – Quantidade em kg e percentual relativo em % (p/p) dos materiais componentes dos isoladores com ferragem	76
Figura 27 – Quantidades relativas dos materiais contidos nas caçambas de polímeros em % (p/p)	79
Figura 28 – Produtos diversos encontrados nas caçambas de plástico: (a) ferragens diversas, (b) transformadores e (c) medidores	80
Figura 29 – Resíduos de EPIs/EPCs considerados em bom estado: (a) calça de tecido cinza, (b) bota de borracha e (c) cinto de couro ainda na embalagem	83
Figura 30 - Micrografia da superfície do biscoito de amostras de cerâmica (imagem obtida originalmente com aumento de 3.000 vezes): (a) marrom nova, (b) marrom usada, (c) cinza nova e (d) cinza usada	84
Figura 31 - Espectro obtido para a amostra de cerâmica marrom nova	85
Figura 32 - Micrografia da superfície do esmalte de amostras de cerâmica (imagem obtida originalmente com aumento de 1.000 vezes): (a) marrom nova, (b) marrom usada, (c) cinza nova e (d) cinza usada	87
Figura 33 - Imagem das gotas depositadas sobre a superfície do isolador: (a) biscoito da cerâmica cinza nova e (b) do polímero usado	89
Figura 34 - Espectros obtidos por difração de raios-X para as amostras cerâmicas	93
Figura 35 - Curva de expansão térmica da cerâmica marrom nova	95
Figura 36 - Micrografias da superfície das amostras de polímero (imagem obtida originalmente com aumento de 3.000 vezes): (a) novo e (b) usado	98
Figura 37 - Amostras de polímero após queima no bico de Bunsen	103
Figura 38 - Espectros de infravermelho sobrepostos de uma amostra nova e uma amostra usada do isolador	104
Figura 39 - Curvas termogravimétricas das amostras de isoladores poliméricos novo (vermelho) e usado (verde)	107
Figura 40 - Curvas de DSC das amostras de elastômero de silicone novo (preto) e usado (azul)	109
Figura 41 – Imagens obtidas por MEV da superfície de amostras de abraçadeira (obtidas originalmente com aumento de 3.000 vezes): (a) nova, (b) usada, superfície em contato com o poste e (c) usada, superfície exposta às intempéries	112
Figura 42 – Imagens obtidas por microscopia ótica de amostras de abraçadeira: (a) nova (obtida originalmente com aumento de 500 vezes); (b) usada, superfície em contato com o poste (obtida originalmente com aumento de 200 vezes) e (c) usada, superfície exposta às intempéries (obtida originalmente com aumento de 500 vezes)	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Solubilidade aproximada de uma substância e seus termos descritivos (U. S. Pharmacopeia, 2009)	55
Tabela 2 – Resíduos sólidos metálicos gerados pela empresa em 2009, preço médio de revenda praticado e o desvio-padrão desses valores	61
Tabela 3 – Resíduos sólidos de materiais diversos gerados pela empresa em 2009, preço médio de revenda praticado e o desvio-padrão desses valores	62
Tabela 4 – Resíduos perigosos gerados pela empresa em 2009 e suas respectivas destinações	63
Tabela 5 – Dados das massas dos materiais encontrados nos para-raios de porcelana	71
Tabela 6 – Dados das massas dos materiais encontrados nas chaves faca	72
Tabela 7 – Dados das massas dos materiais encontrados nas chaves fusível	72
Tabela 8 – Dados das massas dos materiais encontrados nos isoladores pilar	73
Tabela 9 – Dados das massas dos materiais encontrados nos isoladores de disco	73
Tabela 10 – Dados das massas dos materiais encontrados nos isoladores de porcelana marrom tipo cruzeta	74
Tabela 11 – Dados das massas dos materiais encontrados nos isoladores de porcelana marrom tipo castanha	74
Tabela 12 – Dados das massas dos materiais encontrados nos isoladores bastão	75
Tabela 13 – Dados das massas dos materiais encontrados nos isoladores de porcelana tipo roldana	75
Tabela 14 – Resultados da separação dos materiais dos resíduos de alguns fios e cabos de alumínio e cobre e da eventual receita a ser obtida em caso da separação ser adotada	78
Tabela 15 – Quantidades em porcentagem relativa dos materiais separados pela empresa como EPIs	81
Tabela 16 – Quantidades em porcentagem relativa dos materiais separados pela empresa como EPCs	82
Tabela 17 - Composição química das amostras do biscoito de cerâmicas marrom e cinza, nova e usada, da Figura 30	85
Tabela 18 - Composição química das amostras do esmalte das cerâmicas marrom e cinza, nova e usada, da Figura 32	88
Tabela 19 - Resultados de ângulo de contato para as amostras do biscoito e esmalte dos isoladores cerâmicos	90
Tabela 20 - Resultados da determinação da densidade relativa por líquido deslocado das amostras de biscoitos dos isoladores de porcelana, novo e usado	91
Tabela 21 - Resultados de teor de voláteis para as amostras de cerâmica	92
Tabela 22 - Coeficiente dilatométrico (α) para as amostras de cerâmica	95
Tabela 23 - Composição química das amostras de polímero nos pontos destacados na Figura 36	98
Tabela 24 - Resultados de ângulo de contato para as amostras de isoladores poliméricos	100
Tabela 25 – Resultados de densidade relativa por líquido deslocado das amostras nova e usada dos isoladores poliméricos	101
Tabela 26 - Resultados de teor de cinzas para as amostras de polímero	102

Tabela 27 - Resultados dos testes de solubilidade para as amostras de elastômero de silicone de isolador novo e usado	105
Tabela 28 - Resultados do ensaio termogravimétrico das amostras de isoladores poliméricos novo e usado	107
Tabela 29 - Resultados do ensaio de DSC, temperatura de transição vítrea (T_g), temperatura de fusão (T_f) e entalpia de fusão cristalina para as amostras do polímero de isoladores novo e usado	109
Tabela 30 – Composição química em porcentagem relativa em peso das amostras da abraçadeira	113
Tabela 31 – Resultados de ângulo de contato para as amostras de abraçadeiras	114
Tabela 32 – Resultados da determinação da densidade relativa por líquido deslocado da amostra nova e usada de abraçadeira	115
Tabela 33 – Resultados da composição química obtidos pelo ensaio de espectrometria de emissão ótica por centelha para as amostras nova e usada da abraçadeira	116
Tabela 34 – Resultados de dureza das amostras de abraçadeiras	119

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ATH	Alumina Trihidratada
ATR	Reflectância Total Atenuada
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DP	Desvio Padrão
DSC	Calorimetria de Varredura Diferencial
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva
EPC	Equipamento de Proteção Coletiva
EPDM	Etileno-propileno dieno monômero
EPI	Equipamento de Proteção Individual
FTIR	Espectrofotometria de Infravermelho por Transformada de Fourier
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MME	Ministério das Minas e Energia
PCB	Bifenila policlorada
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PET	Politereftalato de etileno
PVC	Policloreto de vinila
RCC	Resíduos da Construção Civil
REEE	Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos
TGA	Análise Termogravimétrica
XLPE	Polietileno Reticulado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVO	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Resíduos Sólidos	4
3.2 Resíduos Metálicos	8
3.3 Resíduos Poliméricos	11
3.4 Resíduos Cerâmicos	16
3.5 Outros Tipos de Resíduos	20
3.6 Técnicas Utilizadas em Caracterização de Materiais	24
3.6.1 Ângulo de contato	24
3.6.2 Microscopia eletrônica de varredura	27
3.6.3 Densidade relativa por líquido deslocado	27
3.6.4 Teor de cinzas em polímero e de voláteis em cerâmica	28
3.6.5 Difração de raios-X em cerâmica	29
3.6.6 Porosimetria por intrusão de mercúrio em cerâmica	30
3.6.7 Dilatometria em cerâmica	31
3.6.8 Identificação por queima e fumaça em polímero	32
3.6.9 Espectrofotometria no infravermelho em polímero	33
3.6.10 Solubilidade em polímero	33
3.6.11 Termogravimetria em polímero	35
3.6.12 Calorimetria de varredura diferencial em polímero	35
3.6.13 Espectrometria de emissão ótica por centelha em metal	36
3.6.14 Análise metalográfica	37
3.6.15 Dureza em metal	38
4 METODOLOGIA	39
4.1 Caracterização dos Resíduos	39
4.2 Avaliação do Potencial de Reciclagem dos Resíduos	43
4.2.1 Amostragem	45
4.2.2 Ensaios realizados em todos os materiais	47
4.2.2.1 Determinação da densidade relativa por líquido deslocado	47

4.2.2.2 Determinação do ângulo de contato	48
4.2.2.3 Microscopia eletrônica de varredura acoplada à espectroscopia de energia dispersiva	48
4.2.3 Ensaios realizados somente em cerâmicas	49
4.2.3.1 Teor de voláteis	49
4.2.3.2 Difração de raios-X	50
4.2.3.3 Porosimetria por intrusão de mercúrio	51
4.2.3.4 Dilatometria	52
4.3.4 Ensaios realizados somente em polímeros	52
4.3.4.1 Teor de cinzas	52
4.3.4.2 Identificação por queima e fumaça	53
4.3.4.3 Identificação por espectrofotometria no infravermelho	54
4.3.4.4 Testes de solubilidade	55
4.3.4.5 Análise Termogravimétrica	56
4.3.4.6 Calorimetria de varredura diferencial	56
4.3.5 Ensaios realizados somente em metais	57
4.3.5.1 Espectrometria de emissão ótica por centelha	57
4.3.5.2 Análise metalográfica	57
4.3.5.3 Dureza	57
 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	 58
5.1 O Atual Sistema de Gestão de Resíduos	58
5.2 Caracterização dos Resíduos com os Dados Internos	60
5.3 Caracterização dos Resíduos com os Resultados do Trabalho de Campo	68
5.4 Avaliação do Potencial de Reciclagem dos Resíduos	84
5.4.1 Ensaios com materiais cerâmicos	84
5.4.1.1 Microscopia eletrônica de varredura acoplada à espectroscopia de energia dispersiva	84
5.4.1.2 Ângulo de contato	89
5.4.1.3 Densidade relativa por líquido deslocado	91
5.4.1.4 Teor de voláteis	92
5.4.1.5 Difração de raios-X	93
5.4.1.6 Porosimetria por intrusão de mercúrio	94
5.4.1.7 Dilatometria	95
5.4.1.8 Conclusões preliminares sobre a reciclabilidade dos materiais cerâmicos descartados	96

5.4.2 Ensaio com materiais poliméricos	97
5.4.2.1 Microscopia eletrônica de varredura acoplada à espectroscopia de energia dispersiva	98
5.4.2.2 Ângulo de contato	100
5.4.2.3 Densidade relativa por líquido deslocado	101
5.4.2.4 Teor de cinzas	102
5.4.2.5 Identificação por queima e fumaça	103
5.4.2.6 Identificação por espectrofotometria no infravermelho	104
5.4.2.7 Solubilidade	105
5.4.2.8 Análise termogravimétrica	107
5.4.2.9 Calorimetria de varredura diferencial	109
5.4.2.10 Conclusões preliminares sobre a reciclabilidade dos materiais poliméricos descartados	111
5.4.3 Ensaio com materiais metálicos	112
5.4.3.1 Microscopia eletrônica de varredura acoplada à espectroscopia de energia dispersiva	112
5.4.3.2 Ângulo de contato	114
5.4.3.3 Densidade relativa por líquido deslocado	115
5.4.3.4 Espectrometria de emissão ótica por centelha	116
5.4.3.5 Análise metalográfica	118
5.4.3.6 Dureza	119
5.4.3.7 Conclusões preliminares sobre a reciclabilidade dos materiais metálicos descartados	120
6 CONCLUSÕES	121
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	123
7.1 Reutilização de Produtos	123
7.2 Avaliação do Ciclo de Vida de Isoladores	123
7.3 Estudo das Abraçadeiras	124
7.4 Outros Estudos	124
8 DIVULGAÇÃO	124
8.1 Trabalhos Divulgados	124
8.2 Outros Trabalhos Divulgados	125
9 REFERÊNCIAS	126

1 INTRODUÇÃO

As empresas, de um modo geral, estão sendo chamadas à responsabilidade não só financeira, mas também ambiental. Existe atualmente um reconhecimento pela sociedade das empresas que tratam os recursos naturais do planeta com parcimônia e respeito, preservando o meio ambiente.

O trabalho de instalação, manutenção periódica e reforma das redes de distribuição de eletricidade gera grandes quantidades de resíduos, os quais trazem preocupação às empresas com a saúde pública e com o custo associado à sua correta destinação final, particularmente daqueles que não encontram mercado consolidado para reutilização e reciclagem.

O setor elétrico gera dois grandes tipos de resíduos: os cuja reciclagem é desenvolvida e a sucata valorizada, como por exemplo, os fios de alumínio e de cobre, e os cuja reciclagem ainda carece de desenvolvimento. No primeiro tipo, tem-se praticamente a separação e a comercialização como únicos pontos a serem explorados. Aliás, a alta reciclabilidade de metais como cobre e alumínio é motivo de preocupação em relação à segurança das redes, dados os comuns furtos de fios e cabos, inclusive em uso, para o reaproveitamento destes materiais. Incluem-se neste tipo também os metais ferrosos em geral devido a sua reciclagem ser bastante desenvolvida, apesar do valor de sua sucata ser normalmente menor que a sucata não ferrosa.

Naqueles cuja reciclagem ainda carece de desenvolvimento incluem-se os materiais poliméricos e os cerâmicos, como por exemplo, os provenientes de isoladores de silicone, porcelana ou vidro. Os polímeros apresentam como uma das dificuldades a relativa ao acúmulo de grande quantidade de material que torne a reciclagem rentável, enquanto as cerâmicas possuem dificuldades intrínsecas de reciclagem e mercado para os reciclados.

Outra dificuldade visualizada para os materiais poliméricos é a quantidade de diferentes tipos de polímeros, cuja separação não é tão óbvia e simples.

Naqueles cuja reciclagem ainda carece de desenvolvimento gerados por empresas que distribuem eletricidade incluem-se, além dos materiais poliméricos e dos cerâmicos, os materiais compósitos. Os compósitos são materiais multifásicos que exibem uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem, de tal modo que é obtida uma melhor combinação de propriedades, como por exemplo, a madeira, que consiste em fibras de celulose resistentes e flexíveis, mantidas unidas através da lignina, que é um material mais rígido. Nas redes de distribuição de energia os compósitos mais comuns são a madeira e o concreto armado, este último na forma de postes (CALLISTER, 2002). Considerada um compósito natural, a madeira é bastante utilizada nas redes de distribuição geralmente na forma de cruzetas, dispositivos colocados nos postes para fixação de isoladores e outros componentes. Nesses casos, as madeiras são expostas às intempéries e, mesmo quando são tratadas superficialmente, podem deteriorar-se ao longo do tempo, exigindo a sua reposição. Essa reposição gera resíduos que normalmente são destinados à queima em fornos cerâmicos (NASCIMENTO, 2006). Além destes, também são utilizados nas redes de distribuição de eletricidade compósitos feitos de polímeros reforçados com fibras, como o compósito epóxi-fibra de vidro, materiais com os quais são geralmente feitas as varas de manobra, utilizadas para auxiliar o reparo e a manutenção das redes.

2 OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho foi analisar o potencial de reciclagem de materiais descartados das redes de distribuição de eletricidade. Como objetivos específicos listam-se: 1) avaliação quanto à composição gravimétrica por tipo de material e quantidade descartada por uma grande empresa de distribuição de eletricidade; 2) Estudos de caracterização físico-química de três materiais contidos em produtos descartados pela empresa; 3) Estudo semelhante dos materiais contidos em produtos similares novos, de modo que a comparação entre as propriedades do material novo e usado auxilie na avaliação da reciclabilidade e/ou eventual reutilização dos resíduos descartados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Resíduos Sólidos

Segundo a norma NBR 10.004 da ABNT, resíduos sólidos são definidos como: “aqueles nos estados sólidos e semi-sólidos, que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição”. Nessa definição, são incluídos lodos de estação de tratamento de água e esgoto, bem como alguns líquidos para os quais o tratamento seja inviável (ABNT, 2004).

A norma estabeleceu uma classificação de resíduos e a partir dela se determinam condições adequadas de armazenamento, transporte e destinação. Pela norma, são três as classes de resíduos, das quais ficam excluídos somente os rejeitos sólidos radioativos, gerenciados no Brasil pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (ABNT, 2004):

Classe I – Resíduos Perigosos: quando o resíduo pode ser enquadrado em pelo menos um dos critérios de periculosidade: reatividade, corrosividade, patogenicidade, inflamabilidade e toxicidade. O enquadramento é baseado em propriedades físicas, químicas e infecto-contagiosas que os resíduos possuam, uma vez que podem representar risco à saúde pública e ao ambiente se manejados inadequadamente.

Classe II-A – Resíduos Não Inertes: aqueles que não forem enquadrados como perigosos nem inertes, podendo apresentar combustibilidade, biodegradabilidade e dissolubilidade em água. Restos de comida, matéria orgânica vegetal e papéis são típicos resíduos desta classe.

Classe II-B – Resíduos Inertes: são resíduos que não são solubilizados em água em concentrações superiores às estabelecidas aos padrões de potabilidade. São

geralmente enquadrados nesta classe de resíduos os vidros, plásticos e os resíduos de construção civil.

Observando-se essas classificações, chega-se a conclusão que é muito mais complicado e oneroso coletar e dispor um resíduo de Classe I do que um resíduo de Classe II. Logo, a simples análise desse aspecto fornece um bom argumento para a adoção de uma gestão responsável por qualquer gerador de resíduo, em especial uma grande empresa. No caso de uma empresa distribuidora de eletricidade, resíduos de todas as classes são gerados e isto torna o seu gerenciamento bastante complexo.

Geralmente abordado junto com o eletrônico, o resíduo elétrico é um tema de preocupação mundial, como no estudo de Babu, Parande e Basha (2007), que descreveu como estes são gerados e classificados, bem como apresentou estratégias e tecnologias para recuperação de materiais e novos desenvolvimentos científicos correlacionados (BABU, PARANDE & BASHA, 2007). Os resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE) são também um tema de preocupação para países em desenvolvimento como a Índia e China, principalmente em virtude de suas quantidades crescentes e à toxicidade potencial (MANOMAIVIBOOL, 2009). Na China, aproximadamente 60% dos resíduos elétricos e eletrônicos são vendidos para coletores individuais privados e passam por processos de reciclagem informais. Para a maioria dos cidadãos chineses, cerca de 64%, os produtores deveriam pagar pela reciclagem dos REEE (LIU & MATSUI, 2006).

A “Lei de Promoção da Economia Circular da República Popular da China” foi aprovada em 29 de agosto de 2008, e desde então adquirem cada vez mais força o conceito de responsabilidade estendida do produtor e um sistema de recuperação centralizado, num país onde as vias informais de reciclagem, tais como mercados de segunda mão e reciclagens manuais, ainda são importantes meios de escoamento dos REEE. O estudo de Veenstra et al

(2010) sugere opções para fortalecer o sistema de reciclagem desses resíduos aproximando-o da política atual (VEENSTRA ET AL, 2010).

Estas discussões também estão ocorrendo em países desenvolvidos como demonstra o estudo de Walther et al (2010). Foi analisada e comparada a situação antes e depois da implementação na Alemanha das “diretivas europeias para os REEE”, que entraram em vigor em 2005, e do “ato do governo para a venda, retorno e disposição ambientalmente adequada de equipamento elétrico e eletrônico (ElektroG)”, sugerindo assim potenciais para melhorias (WALTHER et al, 2010).

Um estudo de caso na Grécia demonstrou a aplicação de uma metodologia para o levantamento das necessidades de um sistema de suporte de decisão para a localização ótima de plantas de tratamento de REEE (ACHILLAS et al, 2010).

Apesar do forte apelo ambiental, a reciclagem de materiais trata-se de uma atividade impactante, pela própria necessidade de acumulação de resíduos e do reprocessamento industrial dos mesmos. Isso geralmente envolve gastos de energia e água consideráveis, além da geração de novos resíduos, sólidos, líquidos ou gasosos.

Por exemplo, um estudo realizado na Alemanha, determinou a composição dos REEE e demonstrou o grau de contaminação em relação aos metais pesados e halogênios, que poderiam ser liberados na reciclagem (DIMITRAKAKIS et al, 2009). Outro interessante estudo mensurou os vários impactos ambientais que existem na coleta destes resíduos. Os autores demonstraram que às vezes o impacto ambiental de certas redes logísticas que percorrem grandes distâncias para a reciclagem destes resíduos pode ser maior do que a não-coleta, como, por exemplo o impacto das emissões de combustível fóssil e substâncias inorgânicas associados com o transporte para reciclagem destes resíduos (BARBAGUTIÉRREZ, ADENSO-DÍAZ & HOPP, 2008).

Estes estudos chamam a atenção para os fabricantes de eletro-eletrônicos, os quais já são responsáveis na Europa pela retirada para tratamento subsequente de todo equipamento após o seu uso. Nesta linha, os fabricantes devem pensar não só na chegada do produto às mãos do consumidor, mas na retirada dele após o uso visando à reciclagem, e esse pensamento deve abordar uma perspectiva ambiental (BARBA-GUTIÉRREZ, ADENSO-DÍAZ & HOPP, 2008, MANOMAIVIBOOL, 2009, LIU & MATSUI, 2006, DIMITRAKAKIS et al, 2009). No estudo de Zoeteman, Krikke e Venselaar (2010) é analisado, entre outros fatores, a legislação que deve promover a responsabilidade estendida para o produtor. O artigo explora a situação atual e futura dos fluxos de REEE de maneira global e investiga mudanças necessárias sob um ponto de vista de desenvolvimento sustentável. Os autores acreditam que deve se colocar os fabricantes originais dos equipamentos no centro das discussões no lugar dos legisladores para assim melhorar as oportunidades, visando uma recuperação em alto grau, diferentemente do que está ocorrendo nos dias atuais (ZOETEMAN, KRIKKE & VENSELAAR, 2010).

Porém, uma leitura mais detida de cada um dos artigos encontrados na literatura científica sobre resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos, revela que não existem estudos específicos sobre resíduos de redes de transmissão e distribuição de eletricidade. Os estudos encontrados dizem respeito a equipamentos elétricos e eletrônicos, geralmente domésticos, tendo a preocupação principal com computadores pessoais descartados (BABU, PARANDE & BASHA, 2007; BARBA-GUTIÉRREZ, ADENSO-DÍAZ & HOPP, 2008; MANOMAIVIBOOL, 2009; LIU & MATSUI, 2006; DIMITRAKAKIS et al, 2009).

Apesar da ausência de estudos específicos sobre resíduos de redes de distribuição de eletricidade, é de se imaginar que uma empresa do ramo lida com quantidades bastante grande de resíduos, somados a enorme variedade. Esses aspectos tornam a gestão do todo e

das várias particularidades existentes extremamente complexa, porém necessária para que se obtenham algumas vantagens, entre elas:

- minimização dos custos com disposição final em aterros, sejam eles para resíduos Classe I, IIA e IIB, em ordem decrescente de custo por quilograma depositado;
- maximização dos ganhos com a venda de material para a reciclagem;
- minimização da geração de resíduos com o apontamento de propostas de melhorias em etapas anteriores;
- cumprimento de legislações, não só ambientais quanto trabalhistas, em virtude do manejo de resíduos e da periculosidade de alguns deles;
- melhora na imagem da empresa, perante seus colaboradores, clientes e sociedade, de modo geral.

3.2 Resíduos Metálicos

Os metais podem ser divididos em dois grandes grupos: os ferrosos e os não ferrosos. Segundo a Prévia da Indústria Mineral 2009/2008 e Anuário Estatístico do Setor Metalúrgico 2008 disponibilizados pelo Ministério das Minas e Energia, somente cerca de 4% dos metais consumidos no mundo são não-ferrosos, aproximadamente 6% são ferros fundidos e o restante é aço (MME, 2009).

Define-se aço como uma liga de ferro contendo no mínimo 0,008% e no máximo 2,11% de carbono, embora teores menores que 1% sejam mais comuns. Já o ferro fundido é também uma liga de ferro, só que contém quantidades superiores a 2,11% de carbono, sendo as mais comuns as que possuem de 3 a 4,5% de carbono. Obviamente outros elementos de liga existem tanto nos aços como nos ferros-fundidos, adicionados intencionalmente ou não, o que pode melhorar propriedades. Uma das desvantagens dos metais ferrosos é a elevada

suscetibilidade à corrosão, o que faz com que boa parte seja utilizada revestida com materiais protetores, como por exemplo, resinas poliméricas (inclusive tintas) ou com outros metais, através de processo de galvanização. Já a introdução de elementos de liga como cromo e níquel pode proteger o ferro da corrosão, sendo que em aços a introdução conveniente desses elementos pode dar origem ao aço inoxidável (SHACKELFORD, 2008).

Apesar de empresas de distribuição de eletricidade gerarem uma quantidade muito grande de sucata não ferrosa, notadamente fios de cobre e alumínio e ligas destes, altamente cobiçados para a reciclagem ou mesmo reutilização, geram também uma grande quantidade de sucata ferrosa, devido as excelentes propriedades mecânicas que o material possui. Embora sua sucata não seja tão valorizada, possui comércio praticamente certo em virtude do alto consumo e da possibilidade de se obter produtos reciclados tão bons quanto os originais, assim como no caso da sucata não ferrosa, desde que devidamente separada (SHACKELFORD, 2008).

A necessidade de separação criteriosa da sucata não ferrosa para a reciclagem se dá pelo fato de que um determinado elemento pode não formar liga com outro. Isso porque as ligas ocorrem por meio de soluções sólidas obtidas durante a solidificação a partir do fundido e para que isso ocorra convenientemente, o soluto (o elemento em menor quantidade) e o solvente (o elemento em maior quantidade) devem apresentar determinadas características individuais e entre si. No caso da sucata ferrosa, a separação por ímã costuma ser suficiente para acumular resíduos que, uma vez fundidos, se transformam num líquido que tem ferro como solvente e vários solutos misturados. A composição final, conforme a necessidade, pode ser ajustada, retirando-se ou colocando-se solutos e aumentando-se ou diminuindo-se a quantidade dos presentes.

Devido ao fato de aliarem preço relativamente baixo somado à alta resistência mecânica, os metais ferrosos são bastante úteis para empresas de distribuição de eletricidade

como suportes das partes isolantes (feitas de polímeros ou cerâmicas) dos isoladores, chaves e para-raios. Também são muito utilizados em caixas que acondicionam o medidor de consumo de eletricidade, parafusos, pinos, suportes, abraçadeiras etc, desde que possuam proteção adequada contra corrosão. Estes tipos de resíduos apresentam um alto potencial de reutilização, pois muitas vezes somente um novo revestimento (após a retirada do revestimento anterior danificado) pode ser suficiente.

Algumas abraçadeiras aparecem circundando o poste e auxiliando na fixação de componentes na Figura 1. A fotografia de uma abraçadeira é apresentada na Figura 2.



Figura 1 – Poste de concreto armado com cruzeta de madeira sustentando seis isoladores cerâmicos tipo castanha.



Figura 2 – Fotografia de uma abraçadeira para poste de eletricidade (Fonte: www.eletrotrafo.com).

3.3 Resíduos Poliméricos

Como os polímeros são geralmente leves, uma grande dificuldade para o desenvolvimento da sua reciclagem é a necessidade de acúmulo de grandes volumes de material para que o empreendimento seja rentável economicamente (EHRIG, 1992; LA MANTIA, 2002; WIEBECK & PIVA, 2005; ZANIN & MANCINI, 2004; MANRICH, FRATTINI & ROSALINI, 1997; MANO, PACHECO & BONELLI, 2006; RADER et al, 1995). Dependendo do porte da empresa distribuidora de eletricidade, esses resíduos podem ser gerados, periodicamente, em quantidades atrativas para indústrias.

Outro problema visualizado para os materiais poliméricos é a presença de diferentes tipos de polímeros, cuja separação pode não ser simples (EHRIG, 1992; LA MANTIA, 2002; WIEBECK & PIVA, 2005; ZANIN & MANCINI, 2004; MANRICH, FRATTINI & ROSALINI, 1997; MANO, PACHECO & BONELLI, 2006; RADER et al, 1995).

Dentre os produtos feitos majoritariamente de polímeros em redes de distribuição de eletricidade destacam-se os isoladores poliméricos, os quais estão substituindo parte dos isoladores de porcelana ou vidro. Constituem-se de um bastão (alma) de compósito (fibras de vidro reforçando uma matriz de resina epóxi ou poliéster) e saias (discos) de elastômeros, geralmente de silicone ou de etileno-propileno, além de ferragens terminais. Possuem vantagens, como leveza e menor suscetibilidade ao vandalismo e à poluição e desvantagens, como menor histórico de uso e manutenção menos desenvolvida em relação a isoladores de porcelana e de vidro (ISOLADORES SANTANA, 2005).

Outro resíduo gerado de redes de distribuição de energia é o material de recobrimento de fios e cabos, que é feito geralmente de policloreto de vinila (PVC), polietileno de alta densidade (PEAD) ou até mesmo em polietileno reticulado (XLPE). Ainda,

empresas de distribuição possuem potencial para a geração de uma grande variedade de resíduos poliméricos presentes, por exemplo, em componentes eletro-eletrônicos, equipamentos de proteção individual (EPIs), equipamentos de proteção coletiva (EPCs) e embalagens, entre outros. Os EPIs e EPCs serão abordados com maiores detalhes no item 2.5.

Geralmente, materiais poliméricos apresentam processo de reciclagem bastante simplificada em termos de conceito. A forma mais comum de reciclagem de polímeros é a reciclagem mecânica, na qual o polímero é inicialmente moído, para posteriormente ser lavado, submetido à secagem e reprocessado por uma nova fusão e dar origem a um novo produto. Este tipo de reciclagem é bastante comum para o PEAD, o PVC e a maioria dos polímeros de grande consumo (EHRIG, 1992; LA MANTIA, 2002; WIEBECK & PIVA, 2005; ZANIN & MANCINI, 2004; MANRICH, FRATTINI & ROSALINI, 1997; MANO, PACHECO & BONELLI, 2006; RADER et al, 1995).

No caso de polímeros utilizados no recobrimento, talvez o grande problema seja a separação destes dos fios e cabos. Por conta da valorização dos metais dos quais são feitos os fios e cabos há no Brasil a prática absurda da queima desses resíduos, o que resulta na geração de uma grande quantidade de gases e fumaça constituídos de polímeros degradados para o ambiente. Indústrias no Brasil já disponibilizam, a custos obviamente mais caros que a queima ilegal, métodos de separação polímero/metal baseados em moagens sucessivas em diferentes moinhos e a posterior separação por densidade.

Para o XLPE e outros elastômeros, assim como para termofixos (normalmente em compósitos), a reciclagem mecânica geralmente não funciona, pois esses polímeros não fundem (EHRIG, 1992; LA MANTIA, 2002; WIEBECK & PIVA, 2005; ZANIN & MANCINI, 2004; MANRICH, FRATTINI & ROSALINI, 1997; MANO, PACHECO & BONELLI, 2006; RADER et al, 1995). Isto ocorre porque durante o processo de fabricação do termofixo ou do elastômero ocorre a vulcanização. Trata-se da formação de ligações

covalentes fortes entre as cadeias (também chamadas ligações cruzadas ou reticulações), resultando numa configuração bastante diferente dos termoplásticos comuns, que apresentam forças de van der Waals, mais fracas, ligando uma cadeia à outra.

No caso dos elastômeros e termofixos, as ligações covalentes intermoleculares (que ligam as cadeias e formam os sólidos) são semelhantes às ligações covalentes internas às cadeias de polímeros (intramoleculares) e, se a temperatura for suficiente para destruir uma ligação intermolecular, também o será para a destruição de uma ligação intramolecular. Isso resulta na degradação do polímero, impede sua fusão e inviabiliza sua reciclagem mecânica (MANO, 1985; MANO, 1991; CANEVAROLO, 2002; RODRIGUEZ, 1970; AKCELRUD, 2007). Dessa forma, outros métodos de reciclagem necessitam ser utilizados, como por exemplo, a reciclagem química ou a energética, que também podem ser aplicados a polímeros convencionais como o PEAD e PVC (EHRIG, 1992; LA MANTIA, 2002; WIEBECK & PIVA, 2005; ZANIN & MANCINI, 2004; MANRICH, FRATTINI & ROSALINI, 1997; MANO, PACHECO & BONELLI, 2006; RADER et al, 1995).

A reciclagem energética consiste na queima controlada de um material visando o aproveitamento da energia contida no mesmo após uma reação de combustão, que produz ainda, quando completa, dióxido de carbono e água. Dessa forma, pode ser aplicada a qualquer tipo de polímero, bem como a outros materiais que contêm carbono, como papéis, vegetais, restos de comida etc. Significa, porém, o processo final no material, pois nada mais poderá ser feito após (EHRIG, 1992; LA MANTIA, 2002; WIEBECK & PIVA, 2005; ZANIN & MANCINI, 2004; MANRICH, FRATTINI & ROSALINI, 1997; MANO, PACHECO & BONELLI, 2006; RADER et al, 1995).

A reciclagem química emprega calor e/ou agentes químicos com o objetivo de quebrar as ligações covalentes intramoleculares e/ou intermoleculares. Dependendo do polímero e das condições de reação, pode gerar uma infinidade de produtos, embora os

monômeros (materiais derivados do petróleo dos quais se iniciam as reações para a obtenção de polímeros) sejam os mais cobiçados (EHRIG, 1992; LA MANTIA, 2002; WIEBECK & PIVA, 2005; ZANIN & MANCINI, 2004; MANRICH, FRATTINI & ROSALINI, 1997; MANO, PACHECO & BONELLI, 2006; RADER et al, 1995).

Nos elastômeros o número de ligações intermoleculares covalentes é relativamente baixo, o que as tornam relativamente suscetíveis a um ataque termoquímico. Assim, a reciclagem química é considerada factível e com viabilidade econômica dependente dos eventuais mercados interessados em versões termoplásticas, e teoricamente revulcanizáveis, dos elastômeros. Por exemplo, Ashihara e colaboradores (2008) desenvolveram uma técnica de reciclagem de resíduos de cabos de isolamento feitos de Si-XLPE com álcool etílico supercrítico, obtendo polietileno (PE) reciclado com propriedades mecânicas similares ao PE virgem, confirmando que a ligação siloxano foi atacada seletivamente. As propriedades do cabo reciclado satisfaz os padrões industriais japoneses para cabo isolante de XLPE para 600 V. Além disso, foi calculado que a emissão de gás carbônico (CO₂) pode ser reduzida por esta tecnologia em comparação com a obtida na fabricação do PE virgem (ASHIHARA et al, 2008).

Oku, Huang e Ikeda reportaram mais de 80% de conversão do silicone vulcanizado no monômero ciclosiloxano após reações dos resíduos moídos em tolueno catalisadas com hidróxido de potássio e posterior adição de tampão ácido (OKU, HUANG & IKEDA, 2002).

Para a borracha de etileno-propileno mais consumida, o elastômero de EPDM (etileno-propileno dieno monômero), Sutanto e colaboradores desenvolveram técnicas e propuseram um modelo cinético de engenharia envolvendo uma reciclagem termomecânica com o auxílio de hexadecilamina como agente desvulcanizante, ou seja, que destrói as ligações cruzadas (SUTANTO et al, 2006).

Radonjic e Gubeljak estudaram ainda métodos de incorporar o EPDM moído como auxiliar (compatibilizante) na mistura de polímeros como polietileno e polipropileno (RADONJIC & GUBELJAK, 2002).

Já para os termofixos o número de ligações cruzadas é relativamente alto (EHRIG, 1992; LA MANTIA, 2002; WIEBECK & PIVA, 2005; ZANIN & MANCINI, 2004; MANRICH, FRATTINI & ROSALINI, 1997; MANO, PACHECO & BONELLI, 2006; RADER et al, 1995), o que faz com que os esforços atualmente estejam se voltando ao desenvolvimento de técnicas como a pirólise, onde o calor é o principal responsável pela quebra das ligações cruzadas. Em reações desse tipo, ligações intramoleculares também são quebradas e o produto final é geralmente um óleo de poder calorífico interessante para queimas posteriores.

A vantagem de se fazer pirólise ao invés da reciclagem energética direta é a possibilidade de, num compósito, recuperar as fibras presentes e a obtenção de combustível líquido ou gasoso. Assim, o estudo de Williams, Cunliffe e Jones concluiu que o óleo obtido da pirólise de polímeros presentes em REEs apresenta propriedades similares ao óleo derivado de petróleo, em termos de viscosidade, conteúdo de enxofre e faixa de destilação, porém com poder calorífico menor (WILLIAMS, CUNLIFFE & JONES, 2005).

Vasile e colaboradores concluíram ser necessária a eliminação de compostos tóxicos antes de usar o óleo obtido por pirólise de REEs como combustível (VASILE et al, 2007).

Já Sekula e Leszczynski após a pirólise de REEs conseguiram reaproveitar peças metálicas anteriormente envolvidas por resina termofixa (SEKULA & LESZCZYNSKI, 2009).

O único estudo encontrado sobre reciclagem de resíduos poliméricos elétricos foi o de De Marco e colaboradores, que apresentaram resultados de pirólise de polietileno

proveniente de revestimento de cabos elétricos. Foram obtidos 44,1% (p/p) de óleo e 23% (p/p) de gases, quantidade considerada suficientes em quantidade para sustentar o processo energeticamente. O metal separado pode ser reciclado e o óleo pode ter um uso potencial como fonte de energia ou na fabricação de substâncias químicas (DE MARCO et al, 2008).

3.4 Resíduos Cerâmicos

Os materiais cerâmicos descartados por empresas distribuidoras de eletricidade geralmente são partes de porcelana presentes nos isoladores, para-raios, chaves-faca e chaves-fusível. Os para-raios são utilizados na proteção das redes contra as descargas atmosféricas, enquanto as chaves-fusível são dispositivos de segurança com o objetivo de evitar a passagem de sobrecargas através do seu desligamento automático. Já as chaves faca também são usadas para o desligamento das redes no caso de intervenções nas linhas. Uma boa parte dos isoladores são fabricados em vidro, geralmente para uso em trechos da rede com vãos muito grandes como travessias, pois possuem uma resistência mecânica maior, em especial à torção.

A Figura 3 apresenta fotografias de chave-fusível, de chave-faca e de para-raio.

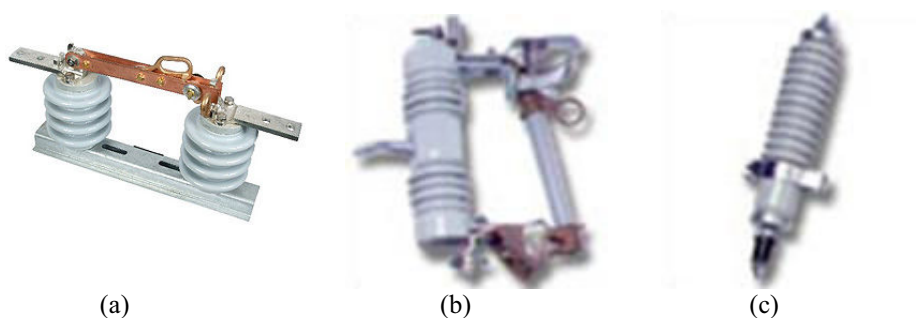


Figura 3 – Isoladores em porcelana: (a) chave faca, (b) chave fusível e (c) para-raio
(Fonte: www.drsul.com).

Apesar de boa parte destes produtos estar sendo substituídos por outros cujas partes isoladoras são poliméricas, os que possuem cerâmicas e vidros ainda são bastante utilizados, e até por conta da substituição, bastante descartados. Porém, sua reciclagem é pouco provável devido a complicações intrínsecas da matéria-prima.

Essas complicações são menores no caso dos vidros do que da porcelana. Vários tipos de porcelana, inclusive as de isoladores, chaves e para-raios, são feitos de misturas de argilas, ligantes (geralmente água), vidro e outros compostos. Após a moldagem e secagem, são levados a fornos onde as partículas que as constituem coalescem umas com as outras, num processo complexo conhecido como sinterização, que fornece a resistência mecânica adequada à aplicação final (KINGERY, BOWEN & UHLMANN, 1976; NORTON, 1973). A Figura 4 apresenta um esquema da sinterização de partículas cerâmicas, destacando-se a mudança no formato final das partículas, no formato dos poros e a retração linear após a queima (ΔL).

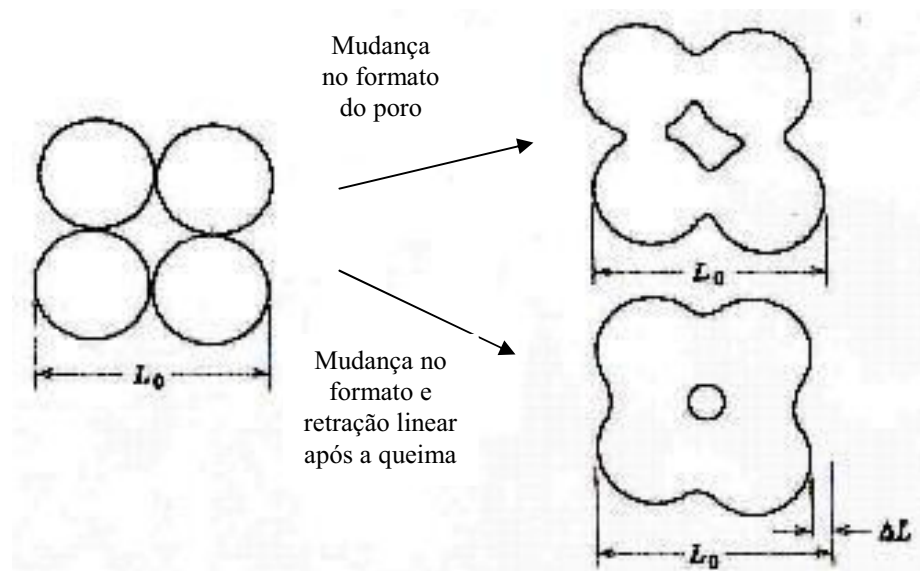


Figura 4 – Esquema de sinterização de partículas, processo típico na fabricação de materiais cerâmicos (KINGERY, BOWEN & UHLMANN, 1976).

Anteriormente à sinterização, peças defeituosas, sobras de processo e outros refugos são perfeitamente recicláveis e geralmente são reincorporados pelos próprios fabricantes na linha de produção.

Porém, peças ou quaisquer refugos sinterizados, bem como produtos pós-consumo descartados, são de reciclabilidade difícil por apresentar partículas sinterizadas.

A coalescência das partículas é o menor dos problemas para a reciclagem, pois da moagem, fundamental para se iniciar o reaproveitamento, podem ser obtidas partículas bastante pequenas aptas para novo contato. Porém, durante a sinterização, além da coalescência dos grãos, podem ocorrer vários fenômenos, como perda de massa, transformações de fase, mudanças cristalográficas e formação de uma segunda fase ou até mesmo uma fase vítrea (KINGERY, BOWEN & UHLMANN, 1976; NORTON, 1973). Se não totalmente irreversíveis, muitos desses fenômenos são de reversibilidade difícil ou improvável, o que torna a reciclagem de cerâmicas visando a produção do mesmo produto original também improvável.

Deve ser acrescentada à dificuldade intrínseca de reciclagem dos materiais cerâmicos, a grande variabilidade de composições de resíduos semelhantes. Este fato pode ser suficiente para dificultar ou inviabilizar a obtenção de um reciclado de qualidade.

A grande possibilidade de reaproveitar materiais cerâmicos sinterizados é como cargas na composição de argamassas e concreto, produtos muito utilizados e que tem nos agregados matérias-primas fundamentais para a obtenção das propriedades requeridas. Os agregados normalmente empregados na construção civil são naturais, como areia e brita, e são aprisionados por uma espécie de “gel” formado pelo cimento após sua hidratação (KINGERY, BOWEN & UHLMANN, 1976; NORTON, 1973). Por conta dessa hidratação, irreversível, dos silicatos e aluminatos presentes no cimento, produtos à base do material

(como os postes de concreto armado) também não conseguem ser reciclados visando a produção de um pó que possa em contato com a água, endurecer novamente.

Materiais cerâmicos sinterizados (como os próprios tijolos de construção) ou cimentícios hidratados são geralmente rígidos e a moagem costuma ser suficiente para quebrá-los em tamanhos variados, inclusive semelhantes à areia e brita (CALAES et al, 2007).

A substituição dos agregados naturais por reciclados tem chamado muita a atenção da comunidade científica e da sociedade de um modo geral, principalmente devido a uma resolução federal que obriga os municípios a gerirem com maior responsabilidade ambiental seus resíduos da construção civil (RCC) (CONAMA, 2002). Nesta gestão mais responsável é instituída a necessidade de que estes resíduos ocupem cada vez menos espaço em aterro, de forma que muitos municípios estão investindo em equipamentos que fazem a moagem e peneiramento dos RCC e reaproveitando o produto final para a conservação de estradas e ruas de terra, como material de cobertura diária de aterros sanitários, na construção de contra-pisos etc. Trata-se de aplicações pouco nobres, mas que até pouco tempo atrás, utilizavam somente agregados naturais e que atualmente começam a utilizar entulho da construção civil, vislumbrando-se a possibilidade de utilização de porcelanas de redes de distribuição de eletricidade. Essa possibilidade foi sugerida por Portella e colaboradores, que em 2006 publicaram um estudo sobre o aproveitamento de porcelanas elétricas em misturas com cimento para a obtenção de concreto (PORTELLA et al, 2006). Outra possibilidade é a utilização dos isoladores descartados sem quebrá-los em aterramentos, proteções de encostas e de outras áreas sujeitas à erosão, aproveitando-se da alta resistência mecânica destas peças.

O problema do grande número de composições diferentes é enfrentado por todos os materiais cerâmicos, mas certamente o vidro é um dos mais afetados. Em compensação, o processo de fabricação do vidro não envolve a sinterização e sim a fusão, tornando a

reciclagem por nova fusão possível e bastante praticada (KINGERY, BOWEN & UHLMANN, 1976; NORTON, 1973). Porém, esta deve ser precedida de uma separação bastante criteriosa dos resíduos a serem reciclados, visando melhorar as propriedades do produto final, podendo aproximar-se bastante das do produto virgem.

Os isoladores de vidro, independente da tensão para as quais são aplicados e do fabricante, possuem vidros de composição similar entre si que permitem obter um reciclado de qualidade e alto valor agregado.

Uma empresa distribuidora de eletricidade pode ser considerada uma importante fonte de vidros descartados de composição semelhante, dados os reparos, manutenções e modernizações necessárias de serem feitas nas redes. Porém, os isoladores de vidro, assim como os de porcelana, são geralmente descartados juntamente com ferragens associadas e podem estar quebrados, representando risco ocupacional. Este risco, a mistura com ferragens e o pequeno número de recicladores de vidro em relação a outros materiais, fazem com que esse material seja pouco atraente a recicladores. Isso porque a separação tem que ser muito criteriosa não só dos tipos de vidro entre si, mas também de outros materiais como metais, plásticos e inclusive poeira, o que faz uma lavagem após moagem talvez seja necessária. Quaisquer impurezas não retiradas podem, dependendo da quantidade, resultar em incrustações ou bolhas que funcionam como concentradores de tensão e núcleos de formação e propagação de trincas, diminuindo as possibilidades de aplicações nobres do reciclado.

3.5 Outros Tipos de Resíduos

Os resíduos metálicos, cerâmicos, poliméricos e na forma de compósitos relatados até aqui tratam-se de resíduos que estão, após sua geração, aptos para a reciclagem e/ou

reutilização. Há, porém, alguns resíduos que são considerados perigosos, ou seja, possuem características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, que podem tornar-se causa, no caso de um manejo inadequado, de problemas ambientais e de saúde dos trabalhadores envolvidos e na população de um modo geral. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) em sua norma 10.004, lista 185 tipos de resíduos que são considerados perigosos (ABNT, 2004).

Dentre os resíduos gerados por empresas distribuidoras de eletricidade, os mais comumente enquadrados como perigosos são telhas de amianto, lâmpadas fluorescentes, latas contendo tinta e resíduos sólidos contendo óleo de transformador. O amianto é considerado nocivo à saúde principalmente dos trabalhadores envolvidos na sua mineração e beneficiamento (WÜNSCH, NEVES & MONCAU, 2001). Porém, também pode apresentar riscos no caso de um manejo equivocado de seus resíduos, por exemplo, que ocasione quebra das telhas em reformas e demolições, podendo eventualmente liberar fibras para o contato com o sistema respiratório.

Lâmpadas fluorescentes exauridas são resíduos perigosos, pois contêm mercúrio, o qual pode ser liberado no caso de um manejo inadequado, além do chumbo contido nos pontos de solda e no bulbo. É possível, porém, encontrar empresas licenciadas para realizar a reciclagem do vidro e demais materiais existentes numa lâmpada deste tipo. Essa reciclagem é feita em um sistema que permite inclusive a recuperação do mercúrio, que pode ser aproveitado numa nova lâmpada (RAPOSO & ROESER, 2000). Obviamente, a reciclagem de lâmpadas de mercúrio exauridas, assim como a reciclagem de qualquer outro resíduo perigoso, envolve um manejo complexo, desde o armazenamento desses resíduos na unidade geradora e o seu transporte seguro até o local de reciclagem.

Latas contendo restos de tinta podem ser classificadas como resíduos perigosos após submeter uma amostra a ensaio de lixiviação padronizado. Segundo a ABNT (2004) o

extrato do lixiviado deve ser analisado quali e quantitativamente e, se resultar numa concentração superior ao limite estabelecido pela norma, o resíduo é considerado perigoso. Em caso negativo, pode ser submetido ao mesmo manejo de resíduos metálicos, com grandes potencialidades de reciclagem. Em caso positivo, ou seja, no caso das latas apresentarem constituintes perigosos, como alguns solventes orgânicos utilizados nas formulações de tintas, e estes estiverem em concentrações superiores às estabelecidas pela normalização, ainda assim podem ser reciclados. Obviamente neste caso, tanto o armazenamento quanto o transporte, além da própria reciclagem, devem ser feitos de modo a se evitar contaminações ambientais e exposição dos trabalhadores envolvidos e, inclusive, dos consumidores do futuro produto reciclado.

Talvez o problema mais característico envolvendo resíduos perigosos em empresas de distribuição de eletricidade seja o relativo aos óleos de transformadores, que podem apresentar em sua composição compostos orgânicos nocivos ao ambiente e/ ou à saúde. O transformador é um componente vital no sistema elétrico e é responsável pela elevação ou redução da tensão necessária para o consumo. O calor gerado é confinado numa espécie de caixa metálica com o auxílio do sistema de isolamento térmica e elétrica composto por papel e óleo (existem ainda transformadores a seco, onde a isolamento é totalmente sólida).

Os transformadores atualmente utilizam óleos minerais, ésteres sintéticos e naturais, mas principalmente óleo de silicone. Até 1981 era permitido no Brasil o uso do ascarel, baseado numa bifenila policlorada (PCB, na sigla em inglês), extremamente tóxica, porém um eficiente óleo de transformador. Acredita-se que procedimentos falhos na troca do ascarel por silicone são responsáveis pelo fato de que o óleo de silicone em uso hoje em dia ainda esteja contaminado com PCBs (ANTONELLO, 2006).

As condições climáticas às quais os transformadores são submetidos e as degradações normais que ocorrem com o papel e óleo devido a longos tempos de vida útil

fazem com que estes tenham que ser monitorados e periodicamente substituídos. Numa manutenção preventiva ou troca programada, o óleo interno deve ser convenientemente drenado, recuperado, reutilizado, tratado e/ ou disposto. Porém, em casos de acidente nessas ocasiões ou principalmente em subestações durante o uso, podem ocorrer o derramamento do óleo e a contaminação do ambiente. Em subestações inclusive é comum que o piso seja feito de britas para, num eventual derramamento de óleo, as mesmas serem removidas e tratadas como resíduos sólidos perigosos. Para estas britas, o mais provável é a disposição em aterros específicos para resíduos perigosos.

Também como resíduos perigosos são tratados os papéis usados nos transformadores, sendo o destino mais provável destes últimos a queima, podendo inclusive ser aproveitado seu poder combustível para outras finalidades.

Empresas distribuidoras de eletricidades também são potenciais geradoras de grandes quantidades de resíduos na forma de equipamentos de proteção individual (EPIs) e equipamentos de proteção coletivas (EPCs) descartados. Boa parte deles se enquadra como materiais poliméricos, mas alguns itens (como roupas, cordas, sacolas de ferramentas, luvas e sapatos de segurança) não costumam ser reciclados, mas possuem boas possibilidades de reutilização. Outros itens majoritariamente poliméricos como cones e placas de sinalização, capacetes, óculos de segurança e viseiras podem ser reciclados, mas isto só deve ocorrer após serem avaliadas possibilidades de reutilização. Nos EPIs e EPCs de empresas distribuidoras de eletricidade potencialmente se descartam ainda ferramentas e dispositivos de segurança metálicos, entre outros resíduos não poliméricos.

Foram abordados até aqui somente resíduos das atividades-fim das empresas que distribuem eletricidade. Porém, estas empresas geram, além destes resíduos, vários outros em suas atividades-meio, como as administrativas. Funcionários administrativos e de qualquer

outro setor, potencialmente vão gerar embalagens, restos de comida, resíduos de banheiro, copos descartáveis, papéis etc, os quais não serão objetos desta Dissertação.

3.6 Técnicas Utilizadas em Caracterização de Materiais

Serão neste item apresentados os aspectos conceituais dos ensaios realizados em isoladores de porcelana, isoladores poliméricos e abraçadeiras de aço, os produtos escolhidos para ensaios de avaliação do potencial de reciclagem. Será abordado ainda em que medida cada ensaio pode colaborar nessa avaliação, principalmente na comparação entre produtos novos e usados (descartados).

3.6.1 Ângulo de contato

O ângulo de contato (θ) entre a superfície de uma amostra e um determinado líquido é o ângulo entre um plano tangente a uma gota do líquido e um plano contendo a superfície da amostra, conforme Figura 5.



Figura 5 – Ângulo de contato (RANGEL, GADIOLI & CRUZ, 2004).

Quando essa gota está em equilíbrio, o ângulo θ é dado pela Equação 1:

$$\cos \theta = \frac{(\gamma_{SV} - \gamma_{SL})}{\gamma_{LV}} \quad (1)$$

Onde γ_{LV} , γ_{SV} e γ_{SL} são as energias de superfície nas interfaces líquido-vapor, sólido-vapor e sólido-líquido, respectivamente (DARBELLO, 2008).

A interação entre um líquido e uma superfície pode ser caracterizada pelo ângulo de contato. Essa interação entre o líquido e a superfície está diretamente relacionada à energia superficial presente em cada material. Essa energia é caracterizada pelo fato de que os átomos presentes na superfície do material se encontram em um estado de energia superior aos apresentados pelos átomos no interior do mesmo. Isto ocorre pois os átomos da superfície acabam não interagindo com o número máximo possível de átomos vizinhos, ao contrário do que ocorre com os átomos presentes no interior do material, como mostra a Figura 6. A diferença entre as energias das espécies na superfície e no interior do material denomina-se energia de superfície e é calculada utilizando os dados de ângulo de contato da amostra com água (polar) e com o diiodometano (apolar) (DARBELLO, 2008; GIANELLI, 2008).

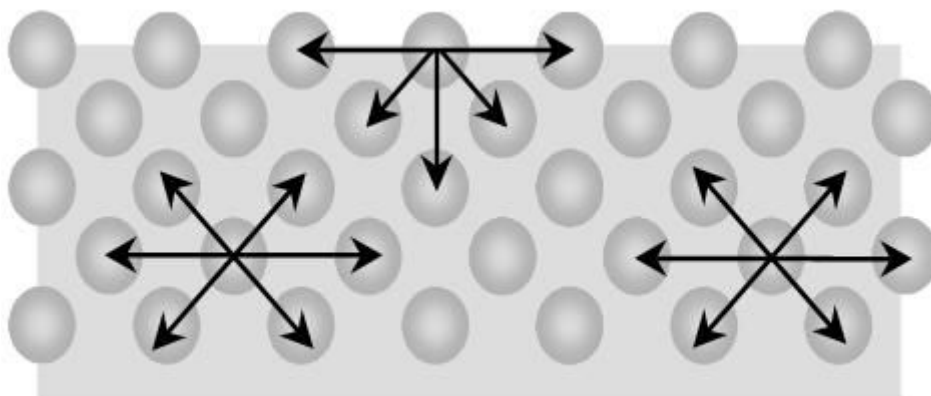


Figura 6 – Forças que atuam nas espécies no interior e na superfície de um material (RANGEL, GADIOLI & CRUZ, 2004).

Baseado no conceito exposto e devido ao fato que na natureza todos os elementos tendem a um estado de menor energia, quanto maior a energia superficial de um material, maior será a superfície de contato entre a gota de um líquido e a superfície. Desta maneira, os átomos da superfície que estão recobertos pela gota terão sua energia livre diminuída. Com uma maior área de contato, o ângulo θ é reduzido. Quando o líquido é a água, para ângulos menores que 90° a superfície é dita hidrofílica, ou seja, possui afinidade com a água. Para ângulos maiores que 90° a superfície é considerada hidrofóbica, com uma baixa afinidade pela água (GIANELLI, 2008).

Isoladores devem cumprir sua função de resistir à corrente elétrica, assim os recobrimentos, em especial em cerâmicas, são importantes para diminuir a possibilidade de contato da parte isolante (o biscoito cerâmico) com a água. Os isoladores podem sofrer impregnação de elementos presentes no ambiente e danos superficiais durante sua vida útil, o que pode culminar inclusive na perda da característica isolante original devido à possível formação de correntes de fuga, prejudicando o uso da peça integralmente (PRETTE, 2007; COSER 2009). A medição do ângulo de contato pode contribuir na avaliação da deterioração da superfície de um isolador durante o uso, ao comparar essa propriedade com a de um isolador novo.

Para as abraçadeiras de aço galvanizado, a variação das propriedades da superfície pode indicar que ocorreram degradações superficiais durante o uso, como a perda do revestimento protetor, o que expõe o metal base ao ataque direto de agentes do tempo (água, oxigênio etc) e outros. Estas degradações podem até colocar em risco propriedades mecânicas do produto, razão da seleção do metal para esta aplicação.

3.6.2 Microscopia eletrônica de varredura

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é muito utilizada para o estudo da morfologia de materiais e um dos motivos para essa ampla utilização é que a preparação de amostras e obtenção de imagens é relativamente simples. Os microscópios eletrônicos utilizam as interações de um feixe fino de elétrons de alta energia com a amostra para formação de imagens. À medida que o feixe de elétrons varre a amostra, a emissão de sinais (elétrons retroespalhados, elétrons secundários e raios-X) é detectada pelo microscópio para a obtenção de imagens e/ou de espectros. Cada sinal produzido pelas interações elétron-matéria é uma fonte de informação característica sobre a amostra. O espectro de raios-X pode fornecer a composição química semi-quantitativa de um ponto da superfície da amostra. Os elétrons secundários fornecem imagem da topografia da superfície e os retroespalhados dão uma idéia da diferença de imagem relacionada à variação da composição (CANEVAROLO, 2004).

Materiais não condutores como poliméricos e cerâmicos geralmente requerem revestimentos condutivos com o objetivo de evitar o acúmulo de carga negativa. A camada de metal deve ser contínua e fina para não mascarar a topografia da superfície da amostra. Os metais mais utilizados são ouro, liga ouro-paládio, platina, alumínio e carbono (CANEVAROLO, 2004).

3.6.3 Densidade relativa por líquido deslocado

A densidade expõe a relação entre a massa e o volume ocupado e trata-se de um importante parâmetro físico dos materiais. Dependendo do produto, um material pode ter diferentes densidades, de modo que é uma propriedade importante para cerâmicas e metais para o dimensionamento de sistemas de transporte e armazenamento, bem como para etapas

da reciclagem propriamente dita, como a moagem de resíduos cerâmicos e a fusão dos metálicos.

Porém, para os polímeros a densidade tem importância ainda maior. Misturas de polímeros podem ser separadas por densidade em banheiras de água ou outros líquidos de densidade conhecida. Densidades muito baixas (como no caso de algumas borrachas, espumas e filmes) podem dificultar a moagem do material e posterior descida dos flocos moídos no funil dos equipamentos. Esta dificuldade justifica o emprego de outras técnicas, como a moagem criogênica ou a aglutinação (MANCINI et al, 2004).

Ainda, comparações entre as densidades de polímeros podem dar informações sobre aspectos importantes internos de um material. Por exemplo, é possível que devido ao uso, um material apresente densidade superior a um novo. Isto pode significar que o material se cristalizou, ou seja, passou por eventos (térmicos e/ou degradativos) que fizeram com que suas cadeias se modificassem aumentando a densidade e podendo gerar mudanças de propriedades, inclusive dimensionais (MIKIYA & KAZUKIYO, 2007). Já com metais e cerâmicas é pouco provável a modificação da densidade durante o uso.

3.6.4 Teor de cinzas em polímero e de voláteis em cerâmica

O teste de teor de cinzas em polímeros e o de voláteis em cerâmicas é realizado para auxiliar na determinação da composição do material. O aquecimento a temperaturas da ordem de 800°C possibilita a eliminação de toda a matéria orgânica e demais voláteis presentes na amostra. Pela diferença entre a massa da amostra antes e após o aquecimento se quantifica a matéria de origem mineral presente, majoritária numa cerâmica e minoritária num polímero, neste último caso chamada de cinza (DARBELLO, 2008). Os elastômeros de

silicone, geralmente o polidimetilsiloxano, são um dos polímeros mais usados na fabricação de isoladores, apresentando sua cadeia principal composta de ligações de átomos de silício ao invés do carbono da maioria dos polímeros. Dessa forma, é de se esperar para estes polímeros um conteúdo inorgânico bastante alto (GARCIA, FARIAS & FERREIRA, 2004).

3.6.5 Difração de raios-X em cerâmica

Os raios-X são radiações eletromagnéticas da mesma natureza que a luz, porém com comprimento de onda bem mais curto, ocupando a região do espectro eletromagnético entre os raios gama e ultravioleta. A unidade de medida nesta região é o angstrom (Å), 10^{-8} cm. Os raios-X usados em difração têm comprimentos de onda de 0,5 a 2,5 Å. São produzidos quando uma partícula carregada eletricamente (geralmente elétrons) com energia cinética suficiente é desacelerada rapidamente. O fenômeno da difração ocorre quando o movimento de uma onda encontra uma série de objetos espaçados regularmente. Um feixe difratado é construído de raios espalhados por planos sucessivos de átomos dentro de um cristal (CULLITY, 1956).

A difração de raios-X utiliza o espalhamento da radiação X por estruturas organizadas, possibilitando o estudo da morfologia de quaisquer materiais. Para esta dissertação, a difração de raios-X foi utilizada predominantemente para determinar diferenças de fases presentes nos materiais cerâmicos ensaiados.

Com a difração de raios-X é possível obter informações sobre as fases cristalográficas presentes de um cristal desconhecido. A difração de um feixe de raios-X, de comprimento de onda λ , nos planos mais densos de átomos da amostra, produz reflexões em determinadas direções, definidas pela lei de Bragg ($n\lambda = 2d \sin \theta$, onde n é um número inteiro

que corresponde a ordem de difração, d é a distância interplanar e θ é o ângulo de incidência do feixe de raios-X), fornecendo assim informações referentes a distância interplanar, que por sua vez relaciona-se com determinada célula unitária e possibilita assim a caracterização da fase cristalina (PADILHA & AMBROZIO-FILHO, 1985; CULLITY, 1956; CANEVAROLO, 2004; SHACKELFORD, 2008). O espectro, chamado difratograma, apresenta uma emissão contínua de baixa intensidade e picos de maior intensidade, pois cada camada eletrônica do átomo possui diversos subníveis de energia (CANEVAROLO, 2004). Enquanto em “x” são apresentados os ângulos de difração, a escala “y” de um difratograma fornece a intensidade relativa do raio difratado, que é proporcional à quantidade do átomo ou da molécula que provocou a difração. No caso dos materiais cerâmicos, as moléculas dos minerais presentes ocasionam as difrações.

3.6.6 Porosimetria por intrusão de mercúrio em cerâmica

A porosimetria por intrusão de mercúrio é uma técnica utilizada para a medição quantitativa da porosidade de materiais sólidos. A forma, tamanho e volume dos poros condicionam a utilidade do material. Algumas características como durabilidade, resistência a corrosão e desgaste dependem da porosidade do material (TEIXEIRA, COUTINHO & GOMES, 2001).

No teste de porosimetria por intrusão de mercúrio é possível determinar o tamanho médio e o volume total dos poros. As características que tornam o mercúrio um líquido utilizado para a determinação da porosidade, são o alto ângulo de contato com a maioria dos materiais (molhabilidade baixa), a alta tensão superficial e a baixa reatividade química com as substâncias. Por isso o mercúrio só penetra na superfície do material sólido

diante da aplicação de uma pressão que será inversamente proporcional ao diâmetro do poro (TEIXEIRA, COUTINHO & GOMES, 2001).

3.6.7 Dilatometria em cerâmica

O teste de dilatometria é utilizado para medir a expansão do corpo de prova em função de uma programação controlada de temperatura e é bastante aplicado na indústria de materiais cerâmicos. De um modo genérico, este teste gera uma curva de queima composta pelo aquecimento, um patamar e o resfriamento (RIBEIRO, STRECKER & VERNILLI, 2000; PETERSON, 2002).

Além das variações dimensionais esperadas de aquecimento e resfriamento de sólidos (normalmente com expansão e retração, respectivamente), em materiais cerâmicos podem acontecer reações químicas no interior da peça durante o aquecimento. Essas reações podem formar diferentes fases no produto final, influenciando as propriedades.

A expansão térmica das cerâmicas é consequência da expansão de cada uma das fases presentes e de suas proporções na microestrutura. O comportamento da fase porosa durante o aquecimento também afeta a dilatação térmica dos materiais cerâmicos (RIBEIRO, STRECKER & VERNILLI, 2000; PETERSON, 2002). A adição de elementos fundentes abaixa a temperatura de sinterização (sinterização via fase líquida), porém pode aumentar a deformação da peça.

Segundo Marino e Boschi (1998) para peças esmaltadas, como os isoladores, é necessário adequar a relação massa-esmalte para que as diferenças de expansão entre o biscoito e o esmalte não resultem na danificação da estrutura da peça. Isso porque as indústrias cerâmicas costumam praticar o processo de monoqueima, onde o corpo cerâmico e

o esmalte são sinterizados em uma só etapa. Caso o coeficiente de expansão térmica seja maior no esmalte do que no biscoito, poderá ocorrer empenamento na superfície esmaltada. Já coeficientes muito menores para o esmalte do que para o biscoito podem ocasionar a fragmentação da peça.

Já para materiais sinterizados, o aquecimento-resfriamento predominantemente pode ocasionar transformações de fases alotrópicas. Para isoladores cerâmicos se espera como reações mais comuns em um teste dilatométrico as alterações alotrópicas do quartzo a aproximadamente, 573 °C e 867 °C (BARBA et al, 1997).

3.6.8 Identificação por queima e fumaça em polímero

O grande número de polímeros disponíveis, o alto descarte de alguns destes materiais e características peculiares de cada um fazem com que testes relativamente rápidos possam auxiliar na identificação. Um dos mais realizados é o teste de queima e fumaça, realizado para a identificação de polímeros através da análise da cor da chama, do odor da fumaça e do comportamento da chama (se o material incendeia ou não diante da retirada da fonte de combustão) etc. Não pode ser considerado um teste preciso, porém é barato, rápido e auxilia na eliminação de algumas suspeitas e na sugestão de que outras podem ser verdadeiras. Este teste apresenta algumas limitações provenientes de características de queima e fumaça eventualmente semelhantes para polímeros diferentes, bem como devido a interferência de plastificantes, estabilizantes e outros aditivos presentes geralmente em materiais pós-consumo (BRAUN, 1999 apud CASTILHOS, 2004; MANO & MENDES, 2000; MANRICH, FRATTINI & ROSALINI, 1997).

3.6.9 Espectrofotometria no infravermelho em polímero

A espectroscopia de absorção na região do infravermelho é uma técnica muito utilizada para caracterização de polímeros, pois além de não ser destrutiva, fornece importantes informações, tais como composição química, estrutura configuracional e conformacional (CANEVAROLO, 2002).

A radiação infravermelha que incide na amostra com determinada intensidade e na mesma frequência da vibração de uma de suas ligações aumentará a amplitude desta vibração, absorvendo parte da energia incidente, reduzindo a intensidade da radiação transmitida, gerando um espectro de infravermelho característico do material em análise (CANEVAROLO, 2002).

O estudo minucioso do espectro em comparação com bancos de dados permite a identificação de cada banda (faixa de comprimento de onda onde uma absorção foi pronunciada) e, conseqüentemente, a identificação da amostra.

Além do fato de ser uma poderosa técnica de identificação de compostos orgânicos, a espectroscopia na região do infravermelho também pode contribuir na investigação de possíveis degradações durante o uso dos isoladores poliméricos, devido a eventuais alterações químicas ocorridas.

3.6.10 Solubilidade em polímero

A solubilidade de polímeros ocorre diferentemente para polímeros termoplásticos, elastômeros e termofixos. A formação de um gel inchado quando as moléculas do solvente se difundem no interior do polímero só ocorre quando as estruturas químicas do polímero e do

solvente são semelhantes. A existência de ligações cruzadas e de interações polímero-polímero muito maiores que as interações polímero-solvente dificultam a solubilização (CANEVAROLO, 2002).

A solubilização de termoplásticos é possível quando as interações polímero-solvente são maiores que as interações polímero-polímero. Nesse caso, as moléculas de solvente são capazes de romper as fracas ligações intermoleculares, levando à desintegração do gel inchado, formando assim uma solução verdadeira (CANEVAROLO, 2002).

Polímeros termofixos e elastômeros são, geralmente, insolúveis. O contato com solventes quimicamente compatíveis levam ao chamado “inchamento” desses, já que o fluido se insere entre as cadeias poliméricas sem conseguir romper as ligações intermoleculares covalentes (ligações cruzadas), características desses polímeros e responsáveis por boa parte de suas propriedades, inclusive as que os diferenciam dos termoplásticos. Polímeros com alta densidade de ligações cruzadas, como são os termofixos, são inertes, pois não sofrem nenhum efeito de solubilização (CANEVAROLO, 2002).

A solubilidade indica o caráter termoplástico de um polímero e sugere a possibilidade de uma reciclagem via fusão (mecânica) ou por solvente (química). Já a impossibilidade de solubilidade sugere a reciclagem energética ou tipos diferenciados de reciclagem química, onde solventes específicos tendem a destruir as ligações cruzadas ou onde o solvente desempenha papel menos importante que o calor (por exemplo, em reações de pirólise) (EHRIG, 1992; LA MANTIA, 2002; WIEBECK & PIVA, 2005; ZANIN & MANCINI, 2004).

3.6.11 Termogravimetria em polímero

As análises térmicas são aplicadas a uma grande variedade de materiais em diversos estudos. A análise termogravimétrica (TGA na sigla em inglês) trata-se de uma das mais utilizadas técnicas de análise térmica, onde a variação da massa da amostra é determinada em função da temperatura e/ou tempo, enquanto esta é submetida a uma programação controlada de variação da temperatura (IONASHIRO, 1980; WENDLANT, 1986; HANES 1995 apud CANEVAROLO, 2004, p. 207).

Durante o aquecimento uma amostra pode passar por desidratação, vaporização, dessorção, oxidação, redução, volatilização etc. Dessa forma, a TGA permite conhecer as alterações que o aquecimento provoca na massa da amostra (CANEVAROLO, 2004, REICH & STIVALA, 1971).

O resultado do ensaio são as curvas termogravimétricas de perda de massa em função da temperatura que fornecem informações quanto à estabilidade térmica da amostra (CANEVAROLO, 2004). Com relação à reciclabilidade de um polímero, a TGA pode fornecer informações como a termoestabilidade, temperatura de secagem, temperatura de queima em caso de reciclagem energética, temperatura de fusão etc.

3.6.12 Calorimetria de varredura diferencial em polímero

Nesta técnica de análise térmica é medida a diferença de temperatura entre a amostra e um material de referência (termicamente inerte na faixa de temperatura medida) em função do aquecimento programado (IONASHIRO, 1980; CANEVAROLO, 2004).

Num dos arranjos mais comuns, o ensaio de Calorimetria de Varredura Diferencial (DSC) por fluxo de calor, amostra e referência são colocadas em cápsulas idênticas sobre um disco termoelétrico e aquecidas por uma única fonte de calor. Dessa forma, a variação de temperatura entre a cápsula contendo a amostra e a cápsula vazia diz respeito a eventos endotérmicos e exotérmicos que ocorreram na amostra, ou seja, se calor foi absorvido ou liberado. Assim, a variação de temperatura obtida é proporcional à variação de entalpia, à capacidade calorífica e à resistência térmica da amostra (CANEVAROLO, 2004). As curvas do ensaio são dadas por um gráfico da variação da entalpia em função da temperatura e podem fornecer informações úteis para avaliação do potencial de reciclagem de um polímero, como relativas à temperatura de transição vítrea, temperatura de fusão, percentual de regiões cristalinas etc. Para um material cerâmico, tanto a DSC quanto a TGA tratam-se de ensaios bastante praticados, porém para materiais anteriormente à sinterização.

3.6.13 Espectrometria de emissão ótica por centelha em metal

Determinar qualitativamente e quantitativamente a composição de metais ferrosos é muito importante para a indústria, dada a variedade de ligas presentes e a possibilidade de mistura delas durante a reciclagem. O metal mais tradicional, o aço, é uma liga de ferro com carbono e mais uma série de outros elementos, adicionados intencionalmente ou não, como manganês, enxofre, silício, fósforo, níquel, cromo, estanho etc (SHACKELFORD, 2008).

A espectrometria de emissão ótica por centelha é uma das técnicas mais empregadas na determinação da composição de aços, por fazer isso rapidamente e com precisão. No ensaio, um eletrodo aplica uma voltagem na amostra sólida, o que excita os átomos presentes fazendo com que cada elemento emita uma onda eletromagnética

característica. Essas ondas são separadas por uma espécie de prisma, gerando um gráfico que permite ao “software” acoplado ao equipamento, com o auxílio de curvas de calibração, identificar (em “x”, pela posição da emissão no espectro eletromagnético) e quantificar (pela altura do pico em “y”) cada elemento presente.

3.6.14 Análise metalográfica

Apesar do desenvolvimento de microscópios eletrônicos potentes e modernos, a microscopia ótica continua sendo uma técnica bastante utilizada na caracterização de metais, em especial aços. Isto porque permite obter informações bastante importantes com equipamentos relativamente baratos e procedimentos de obtenção de amostras normalmente simples.

O conjunto de procedimentos para obtenção de amostras para a microscopia ótica e a posterior observação ao microscópio é chamado de análise metalográfica. Consiste em embutir a amostra, por exemplo, um pedaço de metal com 1 cm x 1 cm, numa resina polimérica (que tem a função de tornar a amostra manuseável), expondo a face que se deseja observar. A amostra passa então por lixamento numa série de lixas (da mais grossa para a mais fina), seguido por polimento, obtendo-se, ao final, uma face espelhada.

Posteriormente, a face na qual as inclusões foram observadas são atacadas quimicamente, geralmente com uma solução diluída de ácido nítrico. Esse ataque permite o destaque das regiões mais abertas da estrutura, os contornos de grão, permitindo as análises.

3.6.15 Dureza em metal

O ensaio de dureza superficial é muito empregado na caracterização de materiais metálicos, incluindo-se aços, devido ao custo dos equipamentos ser relativamente baixo em comparação com outros ensaios mecânicos, bem como pelo fato da operação do mesmo ser simples, assim como o é a obtenção das amostras (geralmente uma superfície plana é suficiente). Porém, o que explica a grande aplicação deste teste na análise de metais é a rapidez na obtenção dos resultados e principalmente porque estes são extremamente úteis, podendo sugerir informações sobre o histórico do material, bem como acompanhar a qualidade de etapas de fabricação, em especial dos tratamentos térmicos (SHACKELFORD, 2008; CHIAVERINI, 1986).

Trata-se de forçar a penetração da amostra analisada por um material de dureza superior, na forma de uma ponta, pirâmide ou esfera etc. Dessa forma existem as mais variadas escalas como Brinell, Vickers, Rockwell, Knoop etc. Por exemplo, na dureza Vickers mede-se o quanto o material foi penetrado a partir das diagonais do quadrado marcado na amostra por uma pirâmide de diamante de base quadrada. A força exercida pela pirâmide, multiplicada por um fator que leva em conta a geometria da pirâmide é dividida pela área do quadrado e indica a oposição feita pelo material ao penetrador. Quando a força aplicada é menor que 1 kgf o ensaio é chamado de microdureza, porém há durômetros Vickers que aplicam até 120 kgf (CHIAVERINI, 1986).

4 METODOLOGIA

Para o cumprimento dos objetivos foi realizada uma pesquisa quantitativa sobre os resíduos gerados nas atividades-fim de uma grande empresa de distribuição de eletricidade.

4.1 Caracterização dos Resíduos

A caracterização inicial dos resíduos foi realizada através da análise de dados obtidos com a empresa dos resíduos gerados no ano de 2009. Ao todo, são vinte e nove as classes de resíduos separadas pela empresa, geralmente enfatizando o produto (o que facilita a separação) e não o material. Esses resíduos são normalmente transportados e armazenados em caixas metálicas vazadas de 1,2 m³, chamadas gaiolas, ou em caçambas de 5 m³.

A partir da análise de dados fornecidos pela empresa foram escolhidos para a realização de uma caracterização mais detalhada em termos de massa, os seguintes resíduos: chave faca, chave fusível e para-raio; isoladores de porcelana ou vidro com ferragem e fios/cabos de alumínio e cobre. Esta escolha se pautou na relevância de cada resíduo em termos de quantidade e/ou valor.

As Figuras 7, 8 e 9 apresentam fotografias destes resíduos no pátio de resíduos da empresa. Na Figura 7 observam-se gaiolas contendo isoladores de porcelana e de vidro com ferragens (a) e chaves e para-raios (b). A Figura 8 apresenta fotografias de resíduos de fios e cabos de alumínio, enquanto a Figura 9, fotografias de fios e cabos de cobre (a) e de alumínio com alma de aço (b).



(a)



(b)

Figura 7 – (a) Gaiola contendo isolador de porcelana ou vidro com ferragem e (b) gaiola contendo chave faca, chave fusível e para-raio.



(a)



(b)

Figura 8 – (a) Fios e cabos de alumínio com isolamento e (b) fios e cabos nu de alumínio sem alma de aço.



(a)



(b)

Figura 9 – (a) Fios e cabos nu de cobre e (b) cabo nu de alumínio com alma de aço.

Devido ao alto valor de revenda e relativa facilidade na separação, durante a geração, com os resíduos contendo fios e cabos foram realizados apenas procedimentos visando a mensuração do metal presente e a identificação do material isolador.

Com os resíduos de chaves faca, chaves fusível, para-raios e isoladores com ferragens foram realizadas cinco amostragens em dias diferentes no período de julho a outubro de 2009 segundo a normalização ASTM D792 (ASTM, 2003). Para resíduos sólidos, esta norma define que se utilize um mínimo de 91 kg.

As chaves-fusível e chaves-faca foram separadas pelo tamanho e pela cor da porcelana (cinza e marrom). Os para-raios foram separados pelo tamanho, pelo material (porcelana e polímero) e os de porcelana também foram separados pela cor (cinza e marrom).

Também foram realizados procedimentos semelhantes visando uma caracterização de resíduos poliméricos (denominados pela empresa como “peças diversas de plásticos”), bem como de EPIs e EPCs, que normalmente são acondicionados em “big-bags”.

A caracterização em termos de massa de cada material procedeu-se inicialmente a partir da separação e contabilização das peças, pois, por exemplo, existem diversos tipos e tamanhos de isoladores. Neste caso específico, os mesmos foram separados por tamanho, por tipo (pilar, disco, cruzeta, castanha e roldana), por material (porcelana, vidro e polímero) e, no caso de isoladores de porcelana, também pela cor (cinza e marrom). Os isoladores de disco foram separados também pelo número de discos (dois ou três discos).

Após a separação foram escolhidas no mínimo uma peça representativa de cada tipo, que foram pesadas e fraturadas. Seus componentes foram separados em materiais isolantes (cerâmica e vidro por diferença de massa), ferrosos, cobre, alumínio e madeira. A separação por material foi efetuada através da experiência prévia do pessoal envolvido e com o auxílio de contato com ímã para confirmar suspeita de materiais ferrosos. Cada peça, assim como seus componentes, foi pesada em balança digital eletrônica com capacidade máxima de

100 kg e divisão de 20 g, marca Michelletti, modelo MIC 100 ou em balança digital eletrônica portátil de capacidade máxima de 5 kg e divisão de 1 g, marca Plenna, modelo MEA 6100. Para os isoladores poliméricos a separação envolveu a remoção mecânica do polímero por corte e raspagem.

A separação dos fios efetuou-se pela amostragem de alguns tipos, sendo realizada a sua separação por material componente. Os materiais foram pesados, determinando assim as suas quantidades relativas em porcentagem em massa (% p/p).

Os plásticos foram separados basicamente pelo tipo de polímero (polipropileno, policarbonato, PEAD, PVC, poliestireno etc.) utilizando-se da experiência prévia do pessoal envolvido. Os EPIs e EPCs foram separados pelo tipo (sapatos, luvas, calças, camisas, jaquetas, óculos, cordas etc), pois se considerou mais interessante investigar possibilidades de reutilização dos mesmos, anteriormente a uma pesquisa sobre o potencial de reciclagem dos materiais que os constituem.

Os resultados destes estudos forneceram uma caracterização diferente da realizada hoje pela empresa, que não leva em conta a presença de mais de um material num determinado produto e/ou configurações do sistema de reciclagem associado ao resíduo. A Figura 10 apresenta um fluxograma que resume a caracterização realizada.

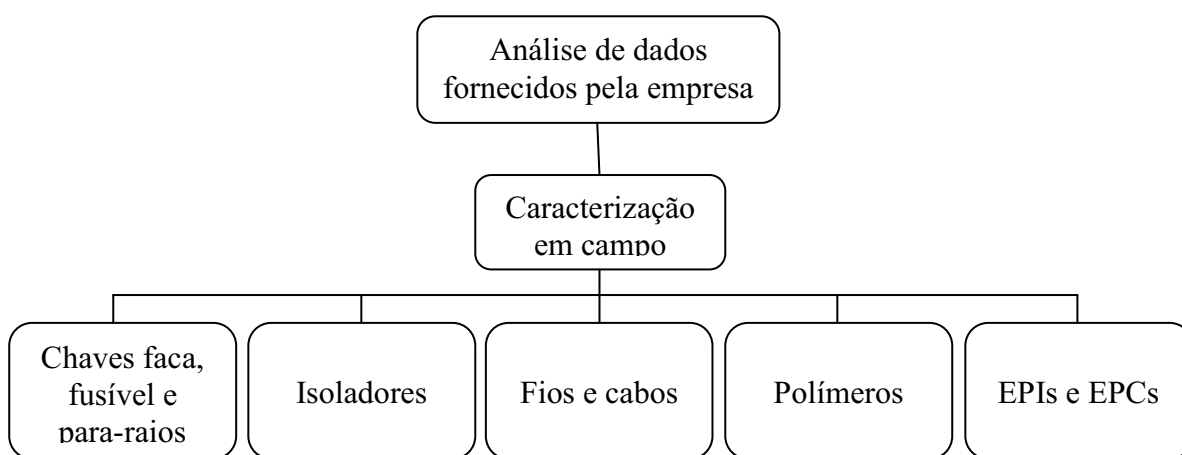


Figura 10 – Fluxograma da caracterização realizada.

4.2 Avaliação do Potencial de Reciclagem dos Resíduos

Com os dados apresentados pela empresa relativos à comercialização de resíduos foram escolhidos três materiais para um estudo aprofundado sobre o potencial de reciclagem: a porcelana e o polímero dos isoladores. A cerâmica foi escolhida devido às grandes quantidades geradas, inclusive em resíduos considerados diferentes (por exemplo, chaves fusível e isoladores). Já o polímero foi selecionado por ser um material que está substituindo os materiais tradicionais, como a cerâmica e o vidro, e que deve se tornar em longo prazo um resíduo significativo.

Observou-se que o item mais descartado pela empresa é o “ferro galvanizado”, sendo boa parte dele constituído de abraçadeiras. Aparentemente, as abraçadeiras descartadas necessitam somente de um novo revestimento para que possam ser reutilizadas. Isso economizaria uma série de recursos naturais empregados na reciclagem (transporte e fusão, por exemplo), fabricação de nova abraçadeira e seu revestimento. Assim, foram incluídas as abraçadeiras entre os produtos nos quais será realizado o estudo sobre o potencial de reciclagem, pois este foi concebido como uma comparação entre propriedades de produtos usados com produtos novos. Dessa forma, os resultados deste estudo podem fornecer informações importantes sobre eventuais degradações da abraçadeira devido ao uso, bem como subsidiar conclusões sobre a possibilidade de reutilização destes produtos.

Outros resíduos poderiam e/ou deveriam ser mais bem estudados, porém não foram considerados para esta Dissertação. Destacam-se, por exemplo, postes de concreto armado, madeira, lâmpadas fluorescentes e óleo de transformador. Outros resíduos, por exemplo, os que contêm condutores, possuem ótimo mercado de reciclagem e por esta razão não foram considerados para o estudo posterior.

A pesquisa sobre o metal das abraçadeiras, a porcelana dos isoladores cerâmicos e o polímeros de isoladores poliméricos envolveu buscas na literatura científica, bem como algumas análises de laboratório. Como já comentado, a função destas foi verificar a qualidade do material contido no resíduo descartado e estimar possíveis rotas de reciclagem.

A Figura 11 apresenta o fluxograma dos ensaios realizados com a porcelana.

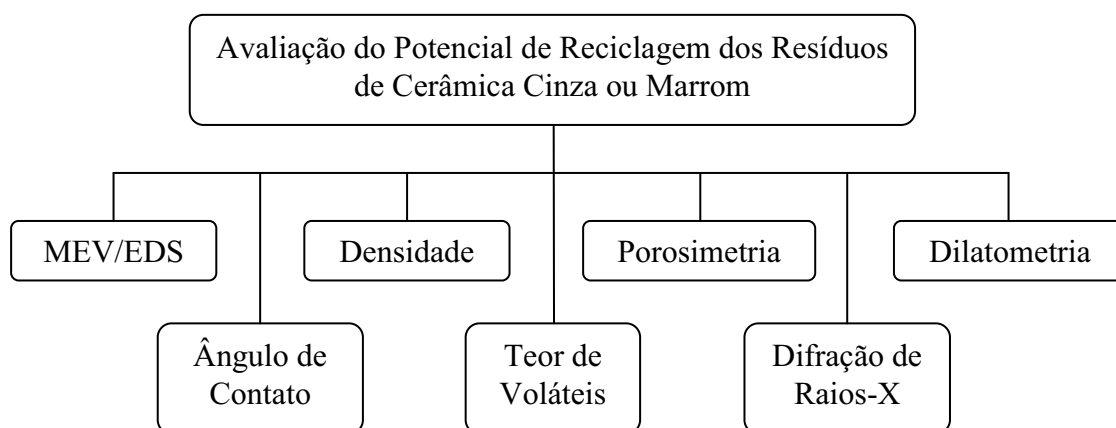


Figura 11 - Fluxograma dos ensaios realizados com a porcelana dos isoladores, onde MEV/EDS corresponde à microscopia eletrônica de varredura acoplada a espectroscopia de energia dispersiva.

A Figura 12 apresenta o fluxograma dos ensaios realizados com o elastômero. A alma do isolador, constituída de epóxi reforçado com fibra de vidro não foi estudada.

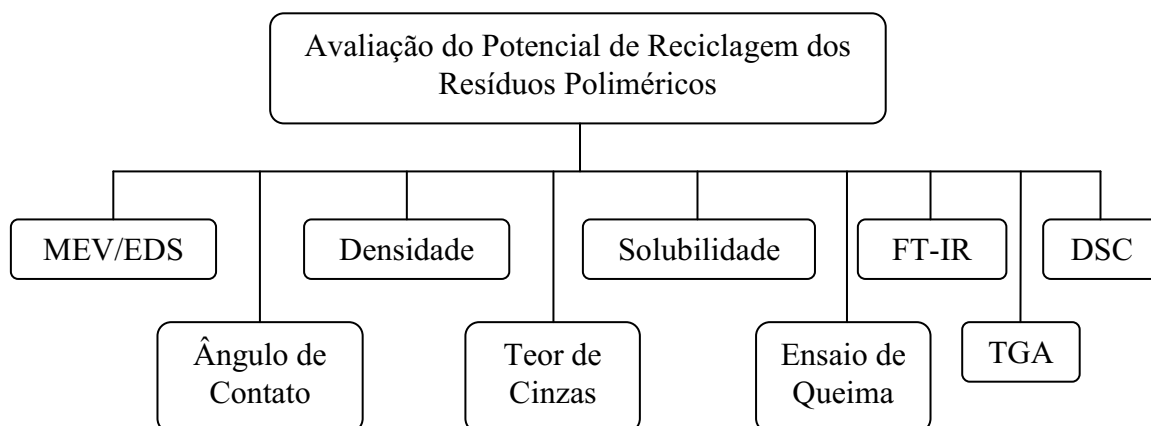


Figura 12 - Fluxograma dos ensaios realizados com o elastômero das abas dos isoladores poliméricos, onde FT-IR corresponde à espectrofotometria de infravermelho por transformada de Fourier, MEV/EDS à microscopia eletrônica de varredura acoplada a espectroscopia de energia dispersiva, TGA à análise termogravimétrica e DSC à calorimetria de varredura diferencial.

Completando, a Figura 13 apresenta o fluxograma dos ensaios realizados com o metal das abraçadeiras novas e usadas.

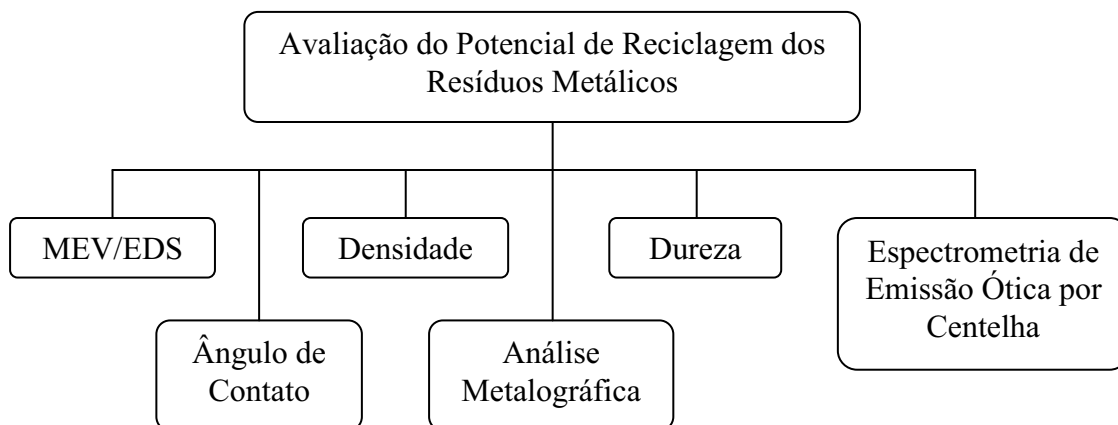


Figura 13 - Fluxograma dos ensaios realizados com o metal das abraçadeiras, onde MEV/EDS corresponde à microscopia eletrônica de varredura acoplada a espectroscopia de energia dispersiva.

4.2.1 Amostragem

As amostras de polímero foram obtidas após corte com auxílio de estilete de pedaços de aproximadamente 1 cm² das abas centrais de cada isolador. Foram utilizados para isso quatro isoladores usados e um isolador novo. Foi tomado o cuidado de efetuar o corte num ponto intermediário da aba, nem próximo ao núcleo e nem próximo à extremidade.

As amostras de porcelana foram cortadas em serra industrial manual com disco diamantado de 350 mm, marca Diamantecno, na marmoraria M2, localizada em Sorocaba-SP. Foram utilizados um isolador cinza usado, um isolador marrom usado, um isolador cinza novo e um isolador marrom novo. Dada a variedade de modelos existentes, em especial nos materiais cerâmicos, escolheu-se um tipo de cada um para os ensaios: para o caso da cerâmica cinza o isolador pilar, para a cerâmica marrom o isolador castanha e para o polimérico o tipo

bastão. Cada um deles foi cortado em pequenos quadrados com lados de 1,5 a 2 cm² e aproximadamente 3 mm de espessura. Todos os ensaios foram realizados na parte interna do isolador, chamada biscoito, que se constitui o corpo do isolador, dá a forma final, possui as propriedades necessárias e recebe uma camada de esmalte com a cor (no caso, marrom ou cinza). Para os ensaios de ângulo de contato e microscopia eletrônica de varredura acoplada a espectroscopia de energia dispersiva, além da parte interna (biscoito) foram analisadas também o esmalte (parte externa).

Finalizando, as abraçadeiras novas e usadas foram cortadas em serralheria em seis amostras de 1,5 a 2 cm² na espessura dos produtos, de cerca de 5 mm. Observou-se nas abraçadeiras usadas que a face que ficou exposta ao tempo apresentava diferenças com relação à corrosão em relação à face que ficou em contato com o poste, o que motivou a análise nas duas faces.

Todas as amostras foram lavadas em banho ultrassônico Cleaner (Unesp-Sorocaba) em água deionizada por cerca de 20 minutos e secas em dessecador por 24 horas. As peças usadas foram escolhidas aleatoriamente das gaiolas que as continham no pátio de resíduos da empresa. No caso dos isoladores cerâmicos, dada a grande variedade, escolheu-se dois tipos representativos para os ensaios, sendo um marrom e um cinza. Já as peças novas (isoladores e abraçadeira) foram retiradas do estoque da empresa.

A idéia de realizar a comparação com amostras de produtos novos foi verificar se o uso trouxe algum prejuízo para o material contido no produto. Isto pode trazer informações sobre sua reciclagem, as potencialidades do reciclado e inclusive sobre se o descarte foi equivocado, o que remete à possibilidade de sua reutilização.

4.2.2 Ensaio realizados em todos os materiais

4.2.2.1 Determinação da densidade relativa por líquido deslocado

A determinação da densidade relativa por líquido deslocado seguiu a norma ASTM D531 (ASTM, 2008a) e foi realizada no Laboratório de Polímeros da empresa INA/Schaffler, em Sorocaba, com auxílio de balança analítica, marca Mettler Toledo, modelo AB 204-S, capacidade de 210 g e erro de 1 mg, com suporte acoplado. Fotografia da balança é apresentada na Figura 14. Cada amostra (foram 5 amostras novas e usadas para a cerâmica e o polímero, e 4 amostras novas e usadas para o metal, obtidas de um único produto usado e de um novo) foi colocada no suporte acoplado ao prato da balança, sendo medida sua massa aparente no ar. A massa da amostra submersa em água foi obtida tomando o cuidado de imergir a mesma em etanol antes de imergi-la em água, para quebrar a sua tensão superficial e assim minimizar a formação de bolhas de ar. Com o valor da massa da amostra no ar (m_{ar}) e na água ($m_{água}$), além da densidade da água ($d_{água}$), a densidade relativa da amostra ($d_{amostra}$) foi calculada, através da equação 2:

$$d_{amostra} = \frac{m_{ar}}{m_{ar} - m_{água}} \times d_{água} \quad (2)$$



Figura 14 – Balança analítica com suporte estacionário para o recipiente de imersão utilizada no ensaio.

4.2.2.2 Determinação do ângulo de contato

Os ensaios de ângulo de contato e energia de superfície foram realizados em goniômetro Ramé-Hart, modelo 100-00, no Laboratório de Plasmas Tecnológicos da UNESP-Sorocaba. Foram depositadas gotas de água deionizada e realizadas 20 medições do ângulo de contato entre a gota e a superfície de cada amostra. Para a obtenção da energia de superfície foram depositadas gotas de diiodometano (líquido apolar) e os resultados foram divididos com aqueles obtidos utilizando-se a água (líquido polar). O cálculo da energia de superfície é realizado pelo “software” do equipamento, o qual utiliza o método geométrico e harmônico para a execução do cálculo. Utilizou-se os resultados obtidos com o método geométrico.

4.2.2.3 Microscopia eletrônica de varredura acoplada à espectroscopia de energia dispersiva

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada no Laboratório de Metais da INA - Schaeffler do Brasil, com um microscópio Quanta Inspect S FEI, acoplado a um dispositivo de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) INCA x-sight - Oxford. No caso das amostras do esmalte cerâmico, os ensaios foram realizados no microscópio eletrônico de varredura Philips XL-30 FEG acoplado a um espectrômetro de energia dispersiva (EDS) do Laboratório de Caracterização Estrutural do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos.

Para a realização da microscopia, as amostras foram aderidas a um porta-amostras de alumínio e, à exceção das amostras metálicas, foram posteriormente recobertas com ouro

no Laboratório de Caracterização Estrutural do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos.

As amostras foram posicionadas no microscópio eletrônico de varredura e submetidas a aumentos de 100 vezes a até 5.000 vezes e as imagens mais representativas foram fotografadas. Posteriormente, alguns pontos das imagens ou as imagens inteiras foram avaliados quanto a sua composição química através do detector de raios-X acoplado ao equipamento.

4.2.3 Ensaios realizados somente em cerâmicas

4.2.3.1 Teor de voláteis

A determinação do teor de voláteis na cerâmica do isolador foi realizada de acordo com a norma D 5630 (ASTM, 2006) em laboratório da UNESP-Sorocaba, usando um forno-mufla Quimis, modelo Q-318M24. Primeiramente, um cadinho de porcelana foi lavado, aquecido a 800 °C em forno-mufla por 5 minutos, resfriado em dessecador e pesado em balança analítica Classe I Bel Engineering modelo Mark 210A de capacidade de 210 g (m_1). Neste mesmo cadinho, foram pesados aproximadamente 5 g de amostra novamente em balança analítica (m_2). O cadinho com a amostra foi colocado em forno-mufla a 800 °C por 30 minutos, resfriado em dessecador e pesado em balança analítica. Novamente o cadinho foi colocado em forno-mufla a 800 °C, porém por um tempo de 15 minutos e mais uma vez foi resfriado e pesado (m_3). A massa do conjunto cadinho + amostra (m_3) só foi considerada constante quando se obteve uma diferença entre as duas pesagens de no máximo 5 mg. Caso contrário, a sequência incineração no forno-mufla por 15 minutos, resfriamento e pesagem foi

repetida. Com os valores de m_1 , m_2 e m_3 , foi calculado o teor de voláteis (% p/p) de acordo com a Equação 3.

$$\text{Voláteis, \% p/p} = \left[1 - \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \right] \times 100 \quad (3)$$

4.2.3.2 Difração de raios-X

O teste de difração de raios-X foi realizado no Laboratório de Cerâmicas do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos. Foram utilizadas amostras do biscoito de cerâmicas marrom e cinza, nova e usada. As amostras foram lavadas com água deionizada, secas em estufa a 110 °C por 24 horas, moídas num almofariz e passadas em peneira de mesh 325.

As medidas foram realizadas à temperatura ambiente num difratômetro Siemens, modelo D 5000, com tubo de cobre e potência de 40 kV x 40 mA e com sistema de filtragem composto por um monocromador secundário de grafite curvo. Raios-X na faixa de 2θ (entre 5° e 100°) a 0,33° por minuto foram incididos na amostra e a reflexão dos mesmos permitiu a confecção de espectros com os quais foram identificadas as fases presentes nas amostras. A identificação das fases foi realizada com o auxílio do programa DIFRAC plus, cuja base de dados é centrada no sistema JCPDS.

4.2.3.3 Porosimetria por intrusão de mercúrio

O ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio também foi realizado no Laboratório de Cerâmicas do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos. Foram analisadas amostras de aproximadamente 0,5 g do biscoito de cerâmicas marrom e cinza, nova e usada, num porosímetro de mercúrio Aminco USA, modelo 5.000 psi - mercúrio, que possibilita ensaios com pressão de enchimento de zero a cinco mil psi. Antes do ensaio, as amostras foram colocadas num banho ultrassônico contendo água deionizada por 2 minutos, lavadas em seguida com água deionizada e secas em estufa a 120 °C por 24 horas. O mercúrio pressionado tenta entrar nos poros da amostra e, conseguindo, tem-se que o volume dos poros abertos é igual ao volume de mercúrio penetrado. Por esta razão, antes da análise porosimétrica houve a retirada de gás da amostra.

A equação 4 é considerada a equação básica da porosimetria e relaciona o tamanho do poro e a pressão necessária para que o mercúrio seja introduzido nele (TEIXEIRA, COUTINHO & GOMES, 2001):

$$D = - 4 \times y \times \theta / p \quad (4)$$

Onde:

D = diâmetro do poro;

y = tensão superficial do líquido;

Θ = ângulo de contato entre o líquido e o sólido, maior que 90°, ou seja, $\cos \theta < 1$, daí o sinal negativo no início da equação;

p = pressão.

4.2.3.4 Dilatometria

O ensaio de dilatometria foi realizado no Laboratório de Cerâmicas do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos. Foram analisadas amostras do biscoito de cerâmicas marrom e cinza, nova e usada, num dilatômetro Northon USA, modelo 1400, com tubo de óxido de alumínio (Al_2O_3), à atmosfera ambiente, onde a temperatura máxima foi de 1.100 °C a uma taxa de aquecimento de 5 °C por minuto. Antes do ensaio, a partir das peças foram obtidas amostras com 1 polegada de comprimento e seção quadrada de 1 cm², as quais foram colocadas num banho ultrassônico contendo água deionizada por 2 minutos, lavadas em seguida com água deionizada e secas em estufa a 120 °C por 24 horas.

Foram construídos gráficos das curvas de expansão térmica em função da temperatura e através do coeficiente angular da parte inicial das curvas foi possível encontrar o coeficiente dilatométrico ou coeficiente de expansão térmica linear.

4.3.4 Ensaios realizados somente em polímeros

4.3.4.1 Teor de cinzas

A determinação do conteúdo de cinzas presentes no polímero sob análise foi realizada de acordo com a norma D 5630 (ASTM, 2006) em laboratório da UNESP-Sorocaba, utilizando-se forno-mufla Quimis modelo Q-318M24. Inicialmente, um cadinho de porcelana foi lavado e aquecido a 800 °C no forno-mufla, por 5 minutos, sendo posteriormente resfriado em dessecador e pesado em balança analítica Classe I Bel Engineering modelo Mark 210A de

capacidade de 210 g e erro de 1 mg (m_1). Neste mesmo cadinho, foi pesado aproximadamente 2,5 g de amostra novamente em balança analítica (m_2). O cadinho com a amostra foi levado ao bico de Bunsen até atingir seu “flash point” (temperatura onde o material vaporiza e forma uma mistura incinerável com o ar) e assim, o mesmo foi queimado até a extinção de qualquer vestígio de chama. Durante o procedimento, tomou-se o cuidado de não provocar perda de material através do controle de intensidade da chama. O cadinho com a amostra incinerada foi colocado em forno-mufla a 800 °C por 75 minutos, resfriado em dessecador e pesado em balança analítica. Novamente o cadinho foi colocado em forno-mufla a 800 °C, porém por um tempo de 30 minutos, resfriado e pesado (m_3). A massa do conjunto cadinho + amostra (m_3) só foi considerada quando se obteve uma diferença entre as duas pesagens de no máximo 5 mg. Caso contrário, o processo de incineração no forno-mufla por 30 minutos, resfriamento e pesagem, foi repetido. O ensaio foi realizado em duplicata. Com os valores de m_1 , m_2 e m_3 , foi calculado o conteúdo de cinzas (% p/p) de acordo com a Equação 5.

$$\text{Cinzas, \% p/p} = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \times 100 \quad (5)$$

4.3.4.2 Identificação por queima e fumaça

Cada amostra foi cortada em aproximadamente 6 pequenas tiras com auxílio de estilete e colocada em barquinha de cerâmica. Em seguida, as barquinhas foram colocadas sobre a chama de um bico de Bunsen até a queima e liberação de fumaça. Foi observado o comportamento da chama e da fumaça, bem como características da última como presença de fuligem e cheiro.

4.3.4.3 Identificação por espectrofotometria no infravermelho

O espectro das amostras foi obtido em espectrofotômetro de infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR) Jasco, modelo 410, do Laboratório de Plasmas Tecnológicos (UNESP – Sorocaba). Foi utilizado o acessório de refletância total atenuada (ATR) horizontal de reflexão simples HATR MIRacle™ com uma ponteira de pressão de giro, que permite que a mesma se mova e ajuste a posição ao formato da amostra, mantendo a mesma paralela à superfície do cristal. O prato de amostragem do acessório tem um cristal circular de 2 mm, dois espelhos direcionadores de feixe de infravermelho e uma abraçadeira de compressão controlada por um micrômetro, que permite o contato íntimo entre as superfícies.

Tanto a ponteira como o cristal foram limpos com isopropanol e secos antes das leituras. A amostra foi colocada sobre a superfície do cristal, tomando o cuidado de permitir um contato íntimo entre as duas superfícies, uma vez que o efeito de ATR acontece muito próximo à superfície do cristal. A Figura 15 ilustra a amostra pressionada contra a superfície do cristal.

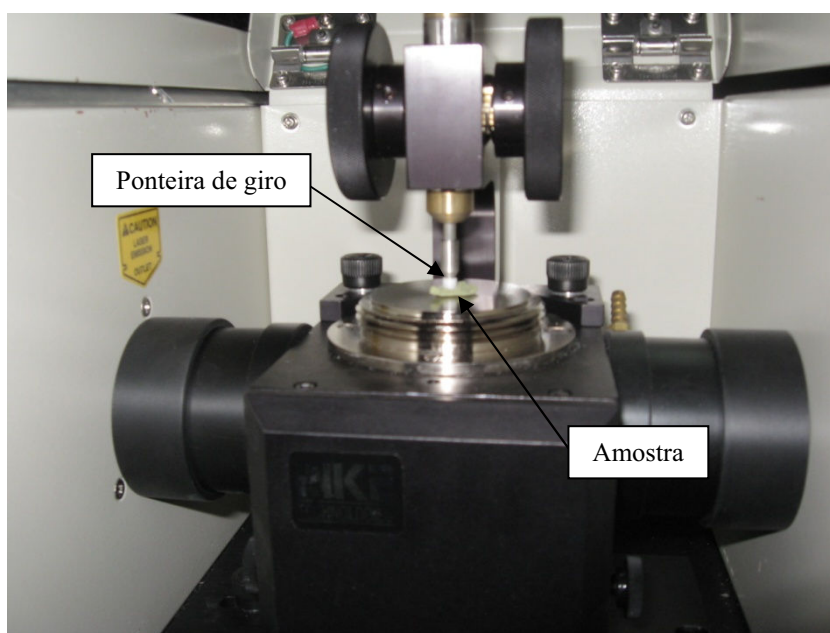


Figura 15 – Amostra sendo pressionada contra a superfície do cristal.

Os parâmetros de medida foram ajustados para 24 varreduras de 400 cm^{-1} a 4.000 cm^{-1} e resolução de 4 cm^{-1} , obtendo espectros de (%) Transmitância no eixo vertical e Número de Onda (cm^{-1}) no eixo horizontal. Após obter o espectro de fundo (“background”) sem a amostra, o espectro de ATR da amostra foi coletado.

4.3.4.4 Testes de solubilidade

Após os testes de identificação do polímero (itens 4.3.4.2 e 4.3.4.3), foram realizados os testes de solubilidade de acordo com os solventes descritos na literatura como bons solventes para o silicone elastomérico (MARK, 1999). Os testes foram feitos com tolueno, xileno, éter etílico, clorofórmio e acetato de etila. Foi utilizado para cada teste (solvente) um pequeno pedaço de polímero, em torno de 10 mg. Em um béquer, foi adicionado lentamente ao polímero o solvente e agitado com bastão de vidro, até o volume de aproximadamente 100 mL. Aguardou-se aproximadamente um minuto. A dissolução ou não do polímero foi observada visualmente, assim como o seu inchamento. A solubilidade foi determinada de acordo com o descrito na Tabela 1.

Tabela 1 – Solubilidade aproximada de uma substância e seus termos descritivos (U. S. Pharmacopeia, 2009).

Descrição	Partes de solvente necessárias para dissolver uma parte do soluto
Muito solúvel	Menor que 1
Livremente solúvel	De 1 a 10
Solúvel	De 10 a 30
Pouco solúvel	De 30 a 100
Ligeiramente solúvel	De 100 a 1.000
Muito ligeiramente solúvel	De 1.000 a 10.000
Praticamente insolúvel, ou insolúvel	Maior ou igual a 10.000

4.3.4.5 Análise Termogravimétrica

As análises termogravimétricas foram conduzidas sob atmosfera de gás inerte (nitrogênio, N₂) em um equipamento TGA da NETZSCH, modelo 209 F1 Phoenix[®], com software analisador Proteus, do Laboratório de Polímeros da empresa INA – Schaffler, em Sorocaba, de acordo com a norma ASTM E1131 (ASTM, 2008c). A taxa de aquecimento utilizada foi 30 °C/min, em uma faixa de 30 a 350 °C, seguido de isoterma nessa última temperatura por 10 minutos, seguido de novo aquecimento na mesma taxa até 750 °C, permanecendo nessa temperatura por 15 minutos até o término do ensaio. A idéia das isotermas é que perdas de massas expressivas que ocorressem nessas temperaturas (detectadas em ensaio prévio anterior) pudessem ser melhor estudadas.

4.3.4.6 Calorimetria de varredura diferencial

Os ensaios de DSC em polímeros novos e usados foram conduzidos conforme ASTM D3418 (ASTM, 2008b) em um equipamento DSC da NETZSCH, modelo 204 F1 Phoenix, com software analisador Proteus, do Laboratório de Polímeros da INA - Grupo Schaeffler em Sorocaba/SP. O ensaio consiste em aquecer uma amostra controladamente no interior de um cadinho de alumínio, simultaneamente ao aquecimento de um cadinho similar vazio. Seguiu-se procedimento típico de análises semelhantes para materiais elastoméricos, sob atmosfera inerte de gás nitrogênio. Inicialmente a temperatura do sistema foi abaixada de 25 °C para 180 °C negativos a 25 °C/min, permanecendo nessa temperatura por 2 minutos para que, posteriormente, fosse realizado aquecimento a 10 °C por minuto até 30 °C.

4.3.5 Ensaios realizados somente em metais

4.3.5.1 Espectrometria de emissão ótica por centelha

Amostras de metais obtidas das abraçadeiras foram lixadas e analisadas no espectrômetro de emissão ótica por centelha ARL 3460 do Grupo Labmat, de Piracicaba. Voltagem de 8 kV foi aplicada à amostra gerando luminosidade posteriormente separada e identificada, sendo o equipamento capaz de analisar os elementos carbono, silício, manganês, fósforo, enxofre, cromo, níquel, molibdênio, cobre, alumínio, vanádio, nióbio, titânio, tungstênio, chumbo e boro.

4.3.5.2 Análise metalográfica

Amostras foram embutidas em baquelite e submetidas a lixamento, polimento e visualização em microscópio ótico Olympus BX51M do Grupo Labmat, de Piracicaba. Posteriormente, a face polida foi submetida a ataque químico em solução a 3% de ácido nítrico e em etanol (Nital) para revelação da sua microestrutura, a qual foi novamente visualizada em microscópio.

4.3.5.3 Dureza

Foi realizado o ensaio de microdureza Vickers nas amostras metálicas em durômetro Buehler do Grupo Labmat, de Piracicaba. O ensaio consistiu em pressionar a pirâmide de diamante com carga de até 1 kgf na face da amostra, em 3 pontos, e manter a pressão por 15 segundos, assim obtendo-se o valor da dureza.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 O Atual Sistema de Gestão dos Resíduos

Os resíduos de uma empresa de distribuição de eletricidade podem ser gerados principalmente de duas maneiras:

- Durante serviços cotidianos e emergenciais de manutenção da rede;
- Durante a realização de projetos de substituição/adequação de redes antigas e de novas instalações.

No caso de serviços cotidianos e emergenciais da rede os resíduos da empresa estudada são gerados na sua área de atuação e são separados nas sedes das subestações e das regionais. Desses locais, os resíduos seguem de caminhão para uma central de resíduos.

Nas regionais também são gerados os resíduos de EPIs e EPCs da empresa, que igualmente são encaminhados à central para destinação. Cada eletricitista ou funcionário que necessite, ganha tais equipamentos a partir de sua admissão na empresa e são obrigados a periodicamente trocarem, como por exemplo, as roupas específicas. Alguns equipamentos, como os capacetes, possuem prazo de validade tanto do material quanto do teste dielétrico pelo qual passam individualmente. Outros equipamentos e algumas ferramentas descartadas como EPI/EPC possuem seu descarte motivado por defeitos visíveis, como luvas isolantes rasgadas. Outros, devido a defeitos não visíveis, dispensa do funcionário ou a critérios pessoais e subjetivos.

Quando há um projeto de implantação de nova rede ou de substituição/adequação de novas redes, as empreiteiras contratadas se comprometem, na assinatura do contrato, com a destinação dos resíduos devidamente separados conforme as regras da companhia para a central de resíduos.

Nesta central, a maioria dos resíduos fica acondicionada a céu aberto, porém a rotatividade no pátio é grande, de modo que os resíduos ficam por pouco tempo expostos ao tempo. Esta exposição é mais prejudicial aos metais (corroem) e madeiras (apodrecem) em relação a outros materiais. Os EPIs/EPCs e os resíduos perigosos são encaminhados a um galpão coberto, impermeabilizado e com caixas de contenção. Os resíduos perigosos são subdivididos conforme são gerados, pois cada um pode necessitar de um tratamento e/ou destinação específico, tendo sido gerados 13 tipos diferentes em 2009. Esses foram encaminhados para 7 empresas diferentes, especializadas e licenciadas para reciclagem (como no caso de lâmpadas e baterias), co-processamento, aterramento classe I, tratamento de efluentes líquidos, tratamento de resíduos sólidos e re-refino de óleo (no caso de lubrificantes usados).

A empresa determina que os resíduos sólidos não perigosos decorrentes das atividades-fim (gerados pelas regionais ou pelas empreiteiras) sejam divididos em 29 itens, divisão esta baseada primariamente no produto descartado e, como segunda prioridade, o material predominante que a compõe.

Não foi obtida uma explicação global sobre o motivo da divisão adotada. Essa divisão aparentemente foi fruto de paulatinas mudanças da gestão de resíduos da empresa e pelo mercado de reciclagem. Apesar de não ser a subdivisão mais indicada em termos de materiais, esta permite o encaminhamento dos 29 itens a um mesmo cliente. Essa venda “casada” dos 29 itens simplifica sobremaneira a gestão de resíduos da companhia, inclusive em termos burocráticos, ao lidar com somente um comprador. Porém, limita o poder de negociação, por já estabelecer a obrigatoriedade da venda em contrato. Caso houvesse a estrutura e pessoal adequado, poderia ser feito uma espécie de “leilão” dos resíduos separadamente. Isso certamente traria benefícios na venda de alguns resíduos, mas correr-se-ia o risco de alguns resíduos encalharem no pátio.

5.2 Caracterização dos Resíduos com os Dados Internos

As Tabelas 2 e 3 apresentam as quantidades de resíduos sólidos gerados pela empresa durante o ano de 2009, bem como o preço praticado pela mesma para a revenda de cada um. Na Tabela 2 estão somente os resíduos cujas partes metálicas são majoritárias (16 no total) e na Tabela 3 está o restante dos resíduos (13 itens). Essas tabelas foram confeccionadas a partir de dados fornecidos pela empresa e representam a geração e posterior comercialização dos resíduos sólidos pela empresa de acordo com a separação realizada atualmente, que subdivide os resíduos em vinte e nove tipos diferentes. Além dos materiais apresentados nas Tabelas 2 e 3, no período estudado registrou-se o descarte anual menos significativo em termos de massa de outros resíduos, porém bastante importante em termos de complexidade, por se tratarem de resíduos perigosos.

Tabela 2 – Resíduos sólidos metálicos gerados pela empresa em 2009, preço médio de revenda praticado, desvio padrão desses valores e a receita gerada.

Descrição	Quantidade (kg)	Preço (R\$/kg)	DP (%)	Receita (R\$)
Aço silício	141.133	1,33	4,4	187.707
Alumínio (cabo triplex)	299.188	2,62	16,4	783.873
Alumínio (fios e cabos com isolação)	147.660	2,57	17,8	379.486
Alumínio (fios e cabos nus, com alma de aço)	62.300	2,75	14,5	171.325
Alumínio (fios e cabos nus, sem alma de aço)	259.132	4,38	16,9	1.134.998
Alumínio com liga (peças diversas)	27.000	2,89	17,5	78.030
Bronze e Latão (peças diversas)	4.620	7,04	1,0	32.525
Chumbo (peças diversas)	33	2,85	3,0	94
Cobre (cabo coberto com chumbo)	84.112	4,25	22,6	357.476
Cobre (cabo seco)	96.152	5,90	24,2	567.297
Cobre (fios e cabos com isolação)	213.748	6,88	26,4	1.470.586
Cobre (fios e cabos flexíveis)	25.266	4,81	23,7	121.529
Cobre (peças diversas)	23	8,88	18,3	204
Cobre nu (fios e cabos)	30.819	9,94	26,3	306.341
Ferro galvanizado (peças diversas)	662.519	0,35	14,4	231.882
Ferro misto	651.645	0,33	10,6	215.043
Total	2.705.350	-	-	6.038.396

Onde: DP é o desvio padrão dos preços.

Tabela 3 – Resíduos sólidos de materiais diversos gerados pela empresa em 2009, preço médio de revenda praticado, desvio padrão desses valores e a receita gerada.

Descrição	Quantidade (kg)	Preço (R\$/kg)	DP (%)	Receita (R\$)
Chave fusível/chave-faca/para-raio	131.611	1,03	6,5	135.559
Elastômero (peças diversas)	600	0,01	0,0	6
Isolador de porcelana ou vidro com ferragem	313.929	0,36	14,6	113.014
Isolador de porcelana ou vidro sem ferragem	182.676	0,01	0,0	1.827
EPI/EPC	29.294	0,01	0,0	293
Madeira (bobinas diversas)	1.640	30,00*	0,0	*
Madeira (cruzetas em bom estado)	17.711	4,09	3,2	72.438
Madeiras e bobinas em mau estado	153.960	0,01	0,0	1.540
Medidores de energia (diversos)	252.595	1,87	22,9	472.353
Mufla e trafo de potencial/corrente	43.493	0,56	0,8	24.356
Polímeros (peças diversas)	34.385	0,06	8,2	2.063
Reator queimado (diversos)	37.163	0,85	0,0	31.589
Relé fotoelétrico	497	0,28	0,0	139
Total	1.199.554	-	-	855.177

Onde: DP é o desvio padrão dos preços.

*As bobinas são vendidas por peça e não por kg.

A Tabela 4 apresenta os resíduos perigosos gerados pela empresa, sua quantidade e a destinação final adotada. Vale lembrar que todos os resultados aqui apresentados dizem respeito aos resíduos gerados pelas atividades-fim da empresa, excluindo-se, por exemplo, resíduos de restaurante, administrativos etc.

Tabela 4 – Resíduos perigosos gerados pela empresa em 2009 e suas respectivas destinações.

Resíduo Classe I	Quantidade	Unidade	Destinação
Latas com restos de tinta	17.981	kg	Co-processamento
Pó de jateamento	9.928	kg	Co-processamento
Resíduos diversos contaminados com óleo	91.231	kg	Co-processamento
Baterias chumbo-ácido	11.820	kg	Reciclagem
Capacitores contaminados com bifenilas policloradas (PCBs)	540	kg	Tratamento
Capacitores contaminados com outros solventes clorados	15.870	kg	Tratamento
Capacitores com outras contaminações	10.740	kg	Tratamento
Solução aquosa de óleo isolante mineral	105.500	kg	Tratamento
Resíduos de amianto	19.990	Kg	Aterro Classe I
Óleo lubrificante usado	3.600	L	Re-refino
Lâmpadas fluorescentes	4.118	Unidades	Reciclagem
Lâmpadas de vapor de mercúrio	7.402	Unidades	Reciclagem
Lâmpadas de vapor de sódio	17.263	Unidades	Reciclagem

Como pode ser observado das Tabelas 2, 3 e 4, em 2009 os resíduos da empresa foram divididos em 42 itens, sendo 29 de resíduos não perigosos e 13 perigosos. Pelas Tabelas 2 e 3 nota-se que no processo de distribuição de eletricidade a empresa gera cerca de 3,90 mil toneladas anuais de resíduos não perigosos, sendo aproximadamente 1,46 mil toneladas somente de materiais ferrosos. Alguns exemplos de resíduos ferrosos são apresentados na Figura 16.



Figura 16 - Exemplos de resíduos ferrosos gerados pela empresa.

Também é gerada cerca de 1,25 mil toneladas/ano de fios de alumínio e cobre, que são materiais valorizados no comércio de recicláveis, com alguns exemplos desses resíduos já apresentados na Figura 9.

Observa-se também pelas Tabelas 2 e 3 que a empresa possui resíduos em grandes quantidades que são vendidos a preços muito baixos, como por exemplo os isoladores sem ferragem e as madeiras em mau estado, que somadas totalizaram 337 toneladas em 2009, vendidos a R\$0,01/kg. Em contra-partida, passaram pelo mesmo pátio de resíduos, 300 toneladas de cabo tripélex de alumínio, vendidos por R\$2,62/kg. A presença de situações tão díspares como as exemplificadas acima mostram como é complexa a gestão dos resíduos

gerados por uma empresa de distribuição de eletricidade. Outro exemplo dessa complexidade é o fato de que uma caçamba com 5 m³ de fios nus de cobre chega a ter valor de revenda da ordem de R\$ 150 mil, o que obriga a adoção de medidas de segurança, como a guarda permanente no pátio de resíduo. Ainda, é imperativa a escolta durante o transporte até o comprador, bem como a isenção dos veículos transportadores de restrições de circulação (rodízio de veículos). A presença de resíduos perigosos, Tabela 4, só acrescenta dificuldades à gestão de resíduos, pois ao invés de algum ganho financeiro com a sua retirada, há perdas. Em 2009 foi gerado um total de 283,6 toneladas de resíduos perigosos, que se somaram a 3.600 litros de óleo lubrificante (cuja empresa de re-refino cobra por volume e não massa) e a 28.783 lâmpadas. São 7 empresas diferentes para onde os resíduos são destinados, sendo que alguns casos (geralmente para os sólidos) a responsabilidade do transporte (não só financeira) é da empresa geradora.

Pelas Tabelas 2 e 3 verifica-se ainda a geração de cerca de 401 toneladas anuais de materiais cuja atividade de reciclagem não é tão valorizada, como é o caso dos polímeros (elastômeros e termoplásticos) e cerâmicas (porcelana e vidro). A disparidade entre a valorização destes resíduos e a dos condutores é a grande justificativa da empresa ter adotado a estratégia de condicionar a venda dos valorizados à aceitação também de resíduos não valorizados.

Analisando as Tabelas 2 e 3 confirma-se que o cobre, alumínio, bronze e latão, e até mesmo a madeira quando em bom estado são materiais altamente valorizados no mercado de reciclagem. Os valores dos fios e cabos de cobre podem variar de R\$4,25/kg (quando recobertos por chumbo, que é um metal menos valorizado) a R\$9,94/kg (fios e cabos nus). O alumínio na forma de fios e cabos nus sem alma de aço possui valor médio de R\$4,38/kg e quando recoberto por polímero seu valor cai para R\$2,57/kg. Portanto, observa-se que a simples separação desses materiais pode resultar na valorização do material mais nobre. O

chumbo tem um valor razoável para venda, de R\$2,85/kg. Já os ferrosos podem possuir valores bem baixos como R\$0,33/kg para o ferro misto, R\$0,35/kg para o galvanizado, até valores superiores, podendo chegar a R\$1,33/kg para o aço silício, utilizado nos transformadores. Porém, as grandes quantidades geradas dos ferrosos, cerca de 652 t/ano, 663 t/ano e 141 t/ano, respectivamente (Tabela 2), fazem sua separação ser extremamente importante para a companhia.

Os valores pagos à empresa pelos resíduos comercializados apresentados nas Tabelas 2 e 3 são médios dentro do período analisado e sofreram variação relativamente grande, atribuída à grande repercussão no mercado de recicláveis da crise econômica mundial iniciada no final de 2008. Pelos desvios padrão apresentados, observa-se que foi o cobre foi o material que mais se desvalorizou no período, enquanto as suas ligas, o bronze e latão, quase não sofreram desvalorização (1% de variação).

Os resultados das Tabelas 2 e 3 estão apresentados na Figura 17, a partir de uma divisão somente em seis itens, porém não mais por produto e sim por material (exceção EPIs). Estes dados são aproximados, visto que a separação da empresa é majoritariamente por produto e não por material. Por exemplo, 21,08% de alumínio abrangem não só o metal alumínio, pois nos fios e cabos com isolamento também tem-se uma parte de material polimérico que os recobre.

Os valores apresentados nas Tabelas 2 e 3 são médios dentro do período analisado e sofreram grande variação, atribuída à grande repercussão no mercado de recicláveis da crise econômica mundial, iniciada no final de 2008. Por exemplo, no caso dos fios e cabos de cobre com isolamento, o seu valor variou de R\$9,68 em junho de 2008 para R\$5,11 em fevereiro de 2009 (queda de 47%) e R\$ 6,77/kg em maio de 2009/kg, demonstrando que o comércio de recicláveis já começava a se recuperar da crise. Pelos desvios padrão apresentados, observa-se

que foi justamente o cobre o material que mais se desvalorizou com a crise. Já, por sua vez, as suas ligas, o bronze e latão quase não sofreram desvalorização (1% de variação).

Foram nomeados como misto a somatória dos resíduos de reatores queimados, medidores de energia, chaves fusível, faca e para-raios, as muflas e trafos de potencial e corrente, os reles fotoelétricos, chumbo e os polímeros, pela pequena quantidade produzida e/ou pela dificuldade intrínseca de separação por material. Os resíduos de bronze e latão foram somados aos resíduos de cobre.

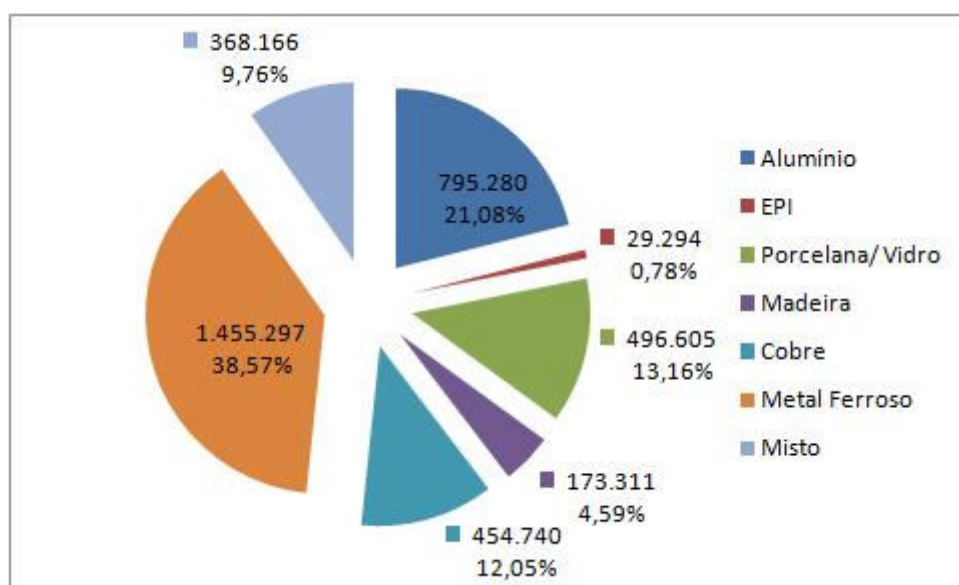


Figura 17 – Composição percentual dos resíduos sólidos gerados pela empresa em 2009.

Os dados da Figura 17 são aproximados, visto que a separação da empresa privilegia mais o produto que o material. Por exemplo, 21,08% de alumínio abrangem não só o metal alumínio, pois nos fios e cabos com isolamento também temos uma parte de material polimérico que recobre os mesmos. Segundo a Figura 17, mais de 70% dos resíduos não perigosos gerados em 2009 pela empresa são metálicos, o que explica a grande atratividade dos mesmos para a reciclagem e a disposição de empresas em pegar os 30% restantes mesmo

que signifique perda de dinheiro. Os condutores representam aproximadamente 33% dos resíduos, sendo cerca de 12% de cobre (incluindo bronze e latão) e 21% de alumínio.

5.3 Caracterização dos Resíduos com os Resultados do Trabalho de Campo

As Figuras 18 a 21 mostram tamanhos, tipos, materiais e cores diferentes de isoladores cerâmicos e de vidro encontrados durante os trabalhos de campo. Observam-se nas fotografias a presença das ferragens acopladas aos isoladores, que possuem a função de sustentação mecânica. Nas gaiolas desses produtos também foi observada a presença de isoladores poliméricos, como o apresentado na Figura 21b, em virtude de não haver separação específica para estes produtos.

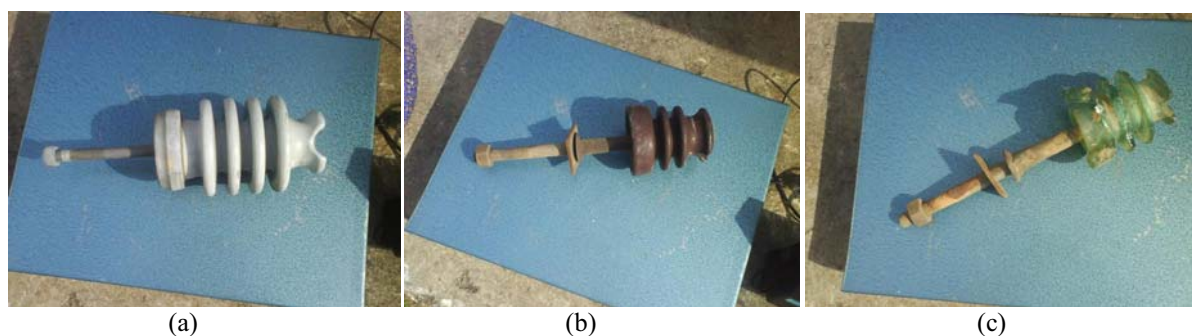


Figura 18 – Isoladores tipo pilar feitos de porcelana cinza, porcelana marrom e de vidro.



Figura 19 – Isoladores de discos feitos de vidro e de porcelana marrom.

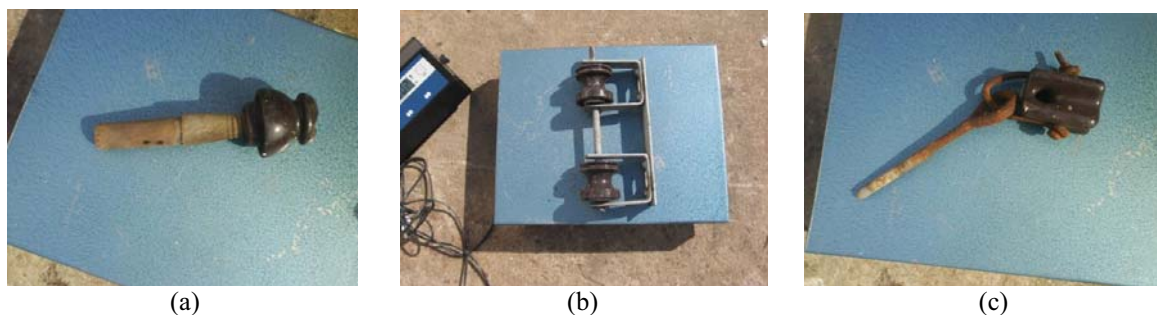


Figura 20 – Isoladores de porcelana marrom: (a) tipo cruzeta com pino de madeira, (b) tipo roldana e (c) tipo castanha.



Figura 21 – Isoladores tipo bastão: (a) de cerâmica cinza, (b) de polímero.

A Figura 22 apresenta exemplos de uma chave-faca (a) e de uma chave-fusível (b) encontradas nos resíduos, enquanto a Figura 23 apresenta alguns exemplos dos para-raios mais comumente descartados pela empresa.



Figura 22 – Chaves cuja parte isoladora é feita de porcelana cinza: (a) faca, (b) fusível.



Figura 23 – Exemplos de para-raios encontrados: (a) parte isoladora feita de porcelana marrom, (b) parte isoladora feita de porcelana cinza, (c) parte isoladora feita de polímero.

Os resultados da separação dos materiais das peças coletadas nas cinco amostragens das “chaves-faca, fusível e para-raios” e dos “isoladores de porcelana e vidro com ferragem” estão apresentados nas Tabelas 5 a 13 para, respectivamente, os para-raios de porcelana (com alguns modelos mostrados nas Figuras 23a e 23b), chaves-faca (Figura 22a), chaves fusível (Figura 22b), isoladores pilar (Figura 18), isoladores de disco (Figura 19), isoladores tipo cruzeta (Figura 20a), isoladores tipo castanha (Figura 20c), bastão (Figura 21a) e isoladores tipo roldana (Figura 20b). As Figuras 18 a 23 mostram apenas modelos de cada isolador, chave ou para-raio encontrados, porém em alguns casos foram encontrados vários modelos diferentes, seja no tamanho, formato, acessórios etc. Cada modelo foi separado e contado, para a posterior contabilização dos materiais presentes somente após a fratura das partes cerâmicas e pesagem (o peso das peças antes da fratura aparece na coluna “inteiras” das tabelas). Consideraram-se esses resultados como representativos para toda a quantidade comercializada pela empresa. A Figura 24 apresenta um para-raio antes e após a separação de seus materiais.

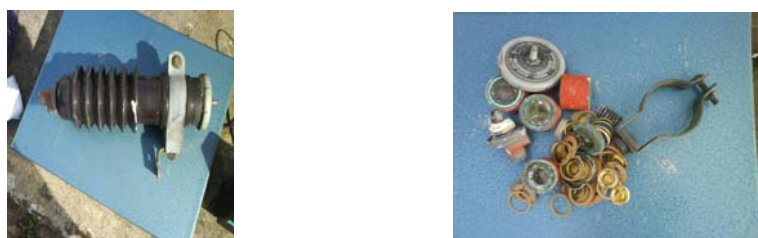


Figura 24 – Para-raio de porcelana marrom (tipo 2 da Tabela 5) antes e após a sua quebra.

Tabela 5 – Dados das massas dos materiais encontrados nos para-raios de porcelana.

Modelo	Número Unidades Encontradas	Número Unidades Fraturadas	Inteiras	Ferragem	Alumínio	Cobre	Porcelana
			Kg				
1	5	1	5,76 – 6,90	1,67 – 2,00	-	-	4,09 – 4,90
			2	15,5	1	2,86 – 4,07	0,43 – 0,61
1	21	1	2,38 – 5,12	0,50 – 1,08	-	0,10 – 0,20	1,79 – 3,84
2	18	1	3,42 – 6,86	0,55 – 1,10	-	0,03 – 0,07	2,84 – 5,69
			3	12	1	3,10 – 4,14	0,43 – 0,58
4*	17	1	3,64 – 4,82	0,51 – 1,69	0,36 – 0,37	-	2,11 – 2,90

*A variação na quantidade de ferro é devido a uma unidade que não apresentava uma parte ferrosa da peça.

Tabela 6 – Dados das massas dos materiais encontrados nas chaves faca.

Modelo	Número de Unidades Encontradas	Número de Unidades Fraturadas	Inteiras	Ferragem	Porcelana
			kg		
Branca 1	7	1	13,88 – 14,26	6,82 – 6,99	7,06 – 7,27
Branca 2	3	1	14,58 -17,38	10,50 – 12,51	4,08 – 4,87
Branca 3	2	2	16,12 – 16,72	11,34 – 11,94	4,78
Branca 4	4	1	15,34	10,22	5,12
Marrom 1	1	1	21,44	18,18	3,26
Marrom 2	2	0*	16,92	12,18	4,74

*Igual à Branca 2.

Tabela 7 – Dados das massas dos materiais encontrados nas chaves fusível.

Modelo	Número de Unidades Encontradas	Número de Unidades Fraturadas	Inteiras	Ferragem	Porcelana
			kg		
Marrom 1	14	1	8,36	3,04	5,32
Marrom 2	95	1	6,12 – 7,34	2,14 – 2,57	3,98 – 4,77
Marrom 3	2	0*	4,52	2,57	1,95
Branca 1	12	1	5,08 – 5,72	3,12 – 3,49	1,96 – 2,23
Branca 2	8	1	7,18 – 9,10	2,76 – 3,55	4,38 – 5,55
Branca 3	58	1	5,22 – 5,76	2,51 – 2,78	2,71 – 2,98

* A ferragem é igual a da Marrom 2.

Tabela 8 – Dados das massas dos materiais encontrados nos isoladores pilar.

Modelo		Número de Unidades Encontradas	Número de Unidades Fraturadas	Inteiras	Ferragem	Cerâmica
				kg		
Porcelana	Marrom 1	446	2	1,98 – 2,20	1,02 – 1,83	0,34 – 1,08
	Marrom 2	4	1	2,66 – 2,88	1,52 – 1,64	1,14 – 1,24
	Marrom 3	9	1	13,22	3,50	9,72
	Marrom 4	11	1	25,04	13,16	11,88
	Branca 1	87	2	2,02 – 4,06	0,36 - 1,15	1,66 – 3,34
	Branca 2	105	2	3,52 – 3,84	0,52 – 1,52	2,08 – 3,32
	Branca 3	2	1	5,60 – 6,12	1,48 – 2,00	4,12
Vidro		15	1	1,80 – 2,06	0,99 – 1,13	0,81 – 0,93

Tabela 9 – Dados das massas dos materiais encontrados nos isoladores de disco.

Modelo		Número de Discos	Número de Unidades Encontradas	Número de Unidades Fraturadas	Inteiras	Ferragem	Cerâmica
					kg		
Porcelana	Marrom 1	2	45	1	4,64 – 5,90	2,90 – 3,72	1,72 – 2,18
	Marrom 2	2 ou 3	82	1	3,28 – 6,94	1,94 – 4,09	1,34 – 2,85
	Marrom 3	3	1	1	6,06	3,60	2,46
	Marrom e vidro	2	2	0*	4,42	2,39	2,03
Vidro	Vidro 1	2	41	1	3,10 – 3,32	1,52 – 1,63	1,58 – 1,69
	Vidro 2	2	72	1	4,04 – 8,06	1,72 – 3,47	2,32 – 4,59

*Foi usada uma proporção média dos modelos de 2 discos de porcelana e de vidro.

Tabela 10 – Dados das massas dos materiais encontrados nos isoladores de porcelana marrom tipo cruzeta.

Modelo	Número de Unidades Encontradas	Número de Unidades Fraturadas	Inteiras	Ferragem	Madeira	Porcelana
			kg			
Sem cabo ou pino 1	18	1	0,52	-	-	0,52
Sem cabo ou pino 2	2	1	0,45	-	-	0,45
Cabo de madeira	13	1	0,56 – 0,66	-	0,12 – 0,14	0,44 – 0,52
Pino metálico 1	9	1	1,22	0,77	-	0,45
Pino metálico 2	5	1	1,46	0,94	-	0,52

Tabela 11 – Dados das massas dos materiais encontrados nos isoladores de porcelana marrom tipo castanha.

Modelo	Número de Unidades Encontradas	Número de Unidades Fraturadas	Inteiras	Ferragem	Porcelana
			kg		
Com parafuso	9	1	1,32 – 1,54	0,70 – 0,82	0,62 – 0,72
Sem ferragem	6	2	0,54 – 0,56	-	0,54 – 0,56
Com ferragem	4	1	3,30	2,24	1,06
Suporte com 3	28	1	1,46 – 1,68	0,77 – 0,89	0,69 – 0,79
Suporte com 4	11	1	1,88 – 2,30	0,74 – 0,90	1,14 – 1,40

Tabela 12 – Dados das massas dos materiais encontrados nos isoladores bastão.

Modelo	Número de Unidades Encontradas	Número de Unidades Fraturadas	Inteiras	Ferragem	Porcelana	Polímero
			Kg			
Porcelana branca	16	1	3,36 – 4,34	1,40 – 1,82	1,96 – 2,52	-
Polimérico	4	1	1,40 – 3,48	0,52 – 1,28	-	0,88 – 2,20

Tabela 13 – Dados das massas dos materiais encontrados nos isoladores de porcelana tipo roldana.

Modelo	Número de Unidades Encontradas	Número de Unidades Fraturadas	Inteiras	Ferragem	Alumínio	Cobre	Porcelana
			Kg				
Marrom 1	19	1	1,26 – 3,38	0,72 – 2,13	-	-	0,50 – 1,25
Marrom 2	7	1	0,78	-	0,26	-	0,52
Marrom 3	22	1	0,52	-	-	-	0,52
Marrom 4	1	1	1,52	1,08	-	-	0,44
Marrom 5	1	1	1,00	0,54	-	-	0,46
Marrom 6	3	1	0,50	-	-	-	0,50
Marrom 7	4	1	0,65	-	-	0,21	0,44
Branco	1	1	0,72	0,18	0,02	-	0,52

Utilizando os dados das Tabelas 5 a 13, foram calculadas as quantidades de cada material presente nas gaiolas coletadas e os resultados do item “chaves faca, fusível e para-raios” e do item “isoladores de porcelana e vidro com ferragem” estão apresentados nas Figuras 25 e 26, respectivamente. Estes resultados expressam a quantidade média em massa de cerâmica, vidro, metais ferrosos e alumínio contidos no item separado pela empresa após a sua separação para esta pesquisa.

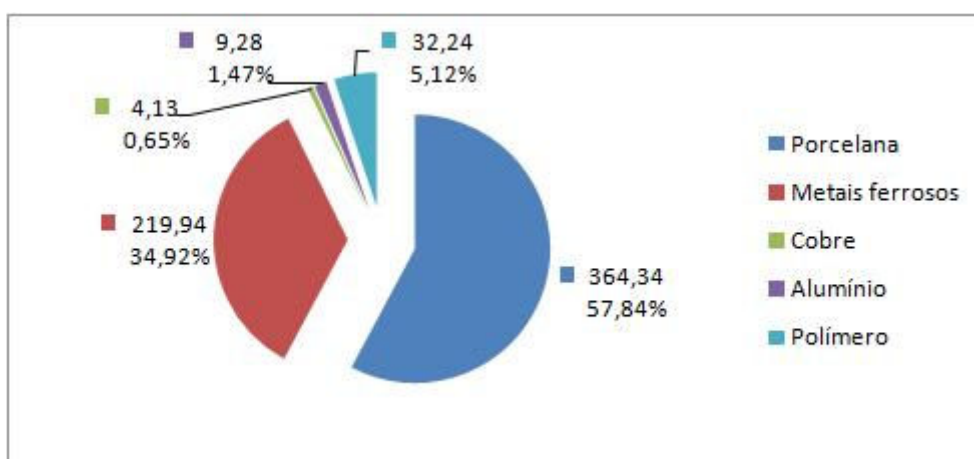


Figura 25 – Quantidade em kg e percentual relativo médio em % (p/p) dos materiais componentes das chaves faca, fusível e para-raios.

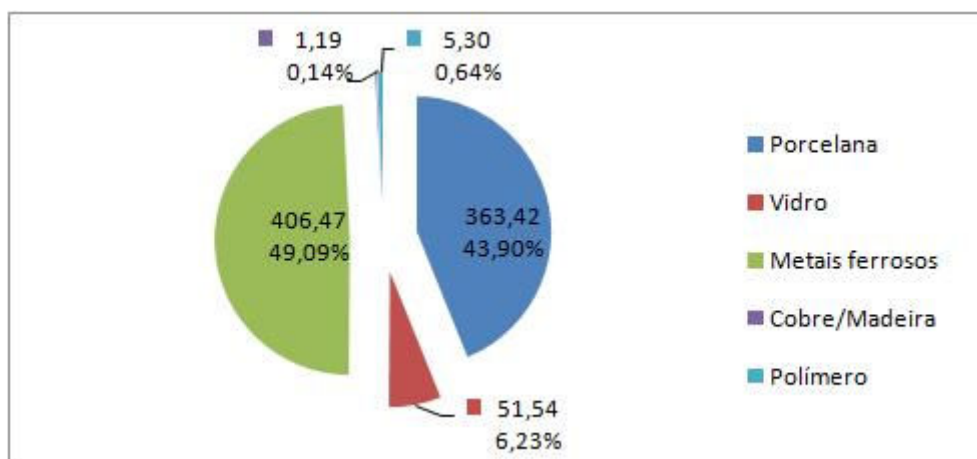


Figura 26 – Quantidade em kg e percentual relativo em % (p/p) dos materiais componentes dos isoladores com ferragem.

A Figura 25 mostra que do total gerado no item “chave faca, chave fusível e para-raio”, tem-se 57,84% de porcelana. Para o item “isolador de porcelana e vidro com ferragem”, a Figura 26 aponta para 43,90% de porcelana e 6,23% de vidro. Tem-se também 34,92% e 49,09% de metais ferrosos contidos nas peças das chaves/para-raios e isoladores, respectivamente. Com as quantidades geradas em 2009 (Tabela 3) desses dois itens seria possível a obtenção de 200.066 kg de metais ferrosos, 213.939 kg de porcelana e 19.558 kg de vidros. Embora o menor valor comercializado para resíduos ferrosos (aço galvanizado, Tabela 2, R\$ 0,35/kg) seja bastante superior ao da cerâmica (R\$ 0,01/kg, Tabela 3) e as quantidades dos primeiros sejam expressivas, é pouco provável a viabilização de uma separação desses materiais dentro da empresa. Isto porque o item “chave faca, chave fusível e para-raio” foi vendido por R\$ 1,03/kg e o item “isolador de porcelana e vidro com ferragem” por R\$ 0,36/kg. A separação é então desvantajosa economicamente para a empresa geradora de resíduos ao levar-se em conta os preços praticados em 2009. Como estes preços podem variar ao longo do tempo, a separação pela empresa pode vir a ser compensatória ou não.

Com a quantidade de metais (ferrosos ou não) presente nesses produtos é pouco provável que o comprador ou algum cliente seu destine esses produtos à disposição final antes de efetuar a separação dos materiais contidos. Após essa separação, a porcelana provavelmente é encaminhada à destinação final em aterros, devido à falta de mercado para a reciclagem. Ao contrário, o vidro apresenta boas chances de ser reciclado.

Conforme descrito na seção 4, os materiais de alguns tipos de fios e cabos coletados foram separados, pesados e seus resultados em receita gerada com a eventual separação e comercialização dos itens separados estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Resultados da separação dos materiais dos resíduos de alguns fios e cabos de alumínio e cobre e da eventual receita a ser obtida em caso da separação ser adotada.

Descrição	Quantidade de resíduo, kg	R\$/kg	Receita sem a separação, R\$	Composição, % material	Receita com a separação, R\$
Alumínio nu com alma de aço	62.300	2,75	171 mil	67% alumínio	190 mil
				33% aço	
Alumínio com isolação	299.188	2,57	769 mil	52,9% alumínio	702 mil
				47,1% polímero	
				76,7% alumínio	1,009 milhão
				23,3% polímero	
Cobre coberto com chumbo	84.112	4,25	357 mil	13,9% cobre	274 mil
				86,1% chumbo	
				20,8% polímero	

Para o cabo de alumínio nu com alma de aço, se houvesse a separação dos componentes haveria um aumento de 10% da receita. Isto porque seria possível angariar aproximadamente R\$ 190 mil no total, sendo R\$ 183 mil só com a venda do alumínio (R\$ 4,38/kg, o preço do alumínio nu, Tabela 2,) e outros R\$ 7 mil com a venda dos 33% de aço (considerando R\$ 0,33/kg, o preço do ferro misto, Tabela 2).

Verificou-se que existem diversos tipos de cabo de alumínio com isolação, sendo que a proporção relativa de alumínio dos tipos amostrados variou de 52,9% a 76,7%. Com o total de resíduos gerados em 2009 seria possível uma receita de R\$ 702 mil a 1,009 milhão caso a separação fosse adotada, ou seja, de 9% inferior a 24% superior à obtida da venda sem separação. Somente com o alumínio seria possível a obtenção de R\$ 693 mil a 1,005 milhão,

dependendo do cabo, o que se somaria com R\$ 4 mil a R\$ 8 mil de receita a ser obtida com a venda do polímero (considerando R\$ 0,06/kg, Tabela 3).

O cabo de cobre coberto com chumbo apresentou 13,9% de cobre, 65,4% de chumbo e 20,8% de polímero. Com a geração desse resíduo em 2009, seria possível arrecadar no caso de uma separação um total de R\$ 274 mil, sendo R\$ 116 mil do cobre (R\$ 9,94/kg, o preço do cobre nu, Tabela 2), R\$ 157 mil do chumbo (R\$ 2,85/kg, Tabela 2) e R\$ 1 mil com o polímero, ou seja, 23% menos que o obtido da venda sem separação.

Os resultados da caracterização dos polímeros estão apresentados na Figura 27. Ressalta-se que na empresa essa classe de resíduos é nomeada como “plásticos”, embora haja além de outros tipos de polímeros, também outros materiais.

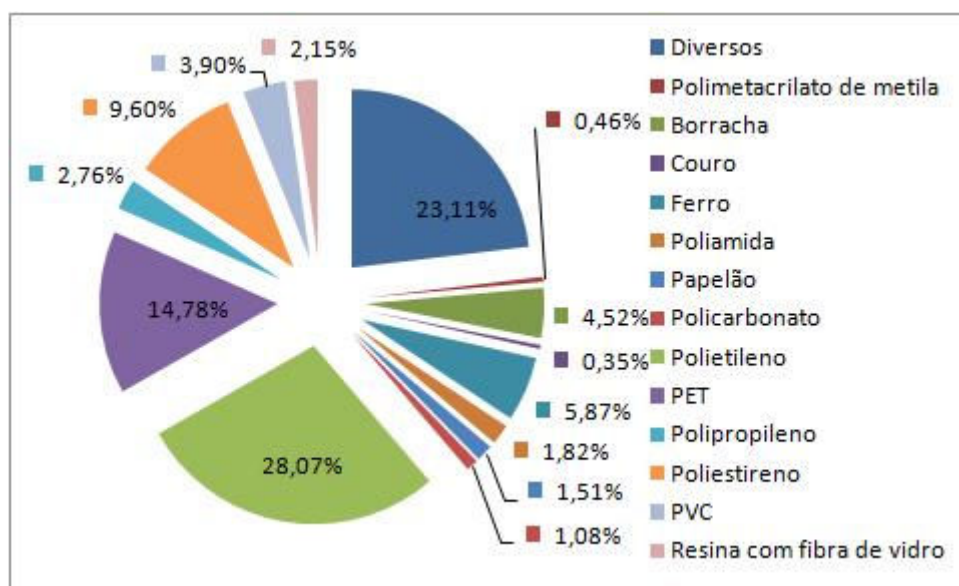


Figura 27 – Quantidades relativas dos materiais contidos nas caçambas de polímeros em % (p/p).

Verifica-se pela Figura 27 que apesar de existirem vários tipos de polímeros, também existe a presença de diversos materiais que poderiam ser vendidos a valores

superiores ao preço pago pelo quilograma de polímero, que é apenas R\$ 0,06/kg. Por exemplo, nos resíduos poliméricos foram encontrados 5,87% de metais ferrosos, ou seja, do total de 34.385 kg gerados anualmente desses resíduos, pode se estimar que 2 toneladas de metais ferrosos poderiam ser vendidos a R\$ 0,35/kg. Ainda, mais recursos podem ser obtidos pela própria segregação dos polímeros encontrados, os quais possuem grande mercado para reciclagem e com preços de sucatas mais atraentes, como o caso do PET, policarbonato, PVC, polipropileno, polietileno etc. Por exemplo, o plástico rígido e o PET, foram vendidos no mercado de reciclagem em 2009 por R\$ 0,20/kg e R\$ 0,75/kg, respectivamente, ou seja, um valor 3 vezes e 12,5 vezes maior que o negociado atualmente pela empresa (CEMPRE, 2009).

Além disso, tem-se 23,11% de peças diversas, tais como transformadores, conversores, “mouses”, medidores, placas eletrônicas e polímeros com ferragem, que também poderiam ser melhor aproveitados na sua venda para reciclagem. Exemplos dos produtos diversos encontrados nas caçambas de polímeros são apresentados na Figura 28.

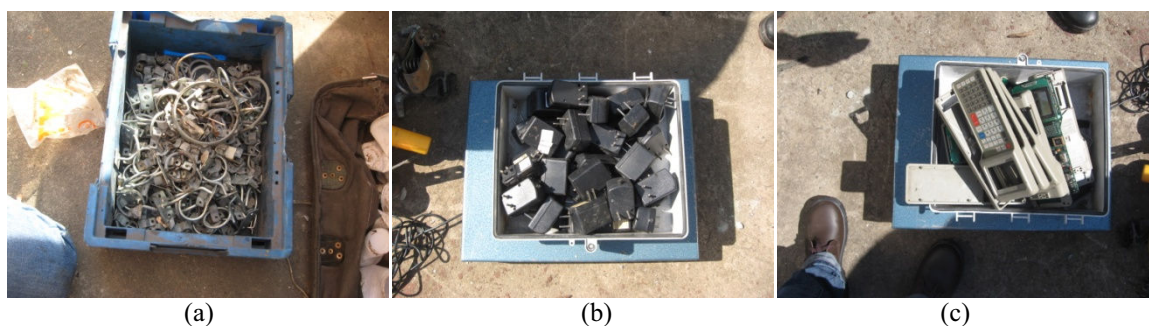


Figura 28 – Produtos diversos encontrados nas caçambas de plástico: (a) ferragens diversas, (b) transformadores e (c) medidores.

Os resultados da caracterização dos EPIs e EPCs estão apresentados nas Tabelas 15 e 16, em ordem decrescente de quantidade. Os EPIs nomeados como diversos são os

coletes, máscaras para solvente e cremes de proteção solar. Os EPCs nomeados como diversos são os “banners”, as chaves liga/desliga, ferragens, as flanelas, as pilhas, as proteções de comando, algumas peças de plástico, cartazes de propaganda e os cabos de madeira. A quantidade total de materiais separados nas cinco coletas realizadas foi de 533 kg. Como já comentado, prosseguiu-se com a idéia de separação por produtos e não por materiais (como se observa na maioria dos itens) devido a potencial possibilidade de reutilização que alguns possuem. Assim, identificou-se 21 itens separáveis que, por terem utilização bem definida, apresentam uma segregação extremamente fácil para os usuários que os descartarem. Porém, caso a reutilização não seja possível, os materiais dos produtos descartados podem ser separados e aproveitados, como o policarbonato dos capacetes e de parte das lanternas, a poliamida das cordas, o PVC de algumas vestimentas, luvas e bandeiras etc.

Tabela 15 – Quantidades em porcentagem relativa dos materiais separados pela empresa como EPIs.

Descrição do EPI	Quantidade relativa
Vestimentas de tecido cinza	20,10%
Calçados	14,51%
Cintos com corda	13,38%
Luvas	11,95%
Perneiras	4,83%
Vestimentas de PVC	4,21%
Capacetes	3,07%
Cintos	2,18%
Cintos de tecido	1,52%
Óculos e acessórios	1,28%
Vestimentas tipo moletom	0,83%
Protetor auricular tipo fone	0,11%
Diversos	0,13%

Tabela 16 – Quantidades em porcentagem relativa dos materiais separados pela empresa como EPCs.

Descrição do EPC	Quantidade relativa
Malas e bolsas	11,00%
Cordas	3,57%
Porta-ferramentas	2,23%
Bandeirolas de sinalização	0,99%
Ferramentas	0,66%
Sinalete	0,38%
Fitas de sinalização	0,24%
Lanternas	0,14%
Diversos	1,63%

Verifica-se pelas Tabelas 15 e 16 que o EPI/EPC mais descartado pela empresa são as vestimentas, representando mais de 25% do total destes resíduos. Também foram encontrados quantidades razoáveis de calçados (14,5% do total), incluindo-se aqui as botinas e sapatos de couro e as botas de borracha e cintos (total de 17,1%). O que chamou a atenção nesses resíduos foi a quantidade de produtos considerados pela equipe como em bom estado. Por exemplo, dentro da amostragem estudada considerou-se um descarte prematuro de 43 calças, 48 camisas, 10 jaquetas e 19 botas que totalizaram 72 kg de EPIs, ou aproximadamente 13% do total de resíduos descartados. Obviamente o conceito de “em bom estado” é relativo, de modo que um padrão a ser estabelecido pela companhia pode ser útil.

A Figura 29 apresenta fotografias de calça e botas de borracha consideradas pela equipe como em bom estado, bem como um cinto de segurança descartado ainda em sua embalagem.

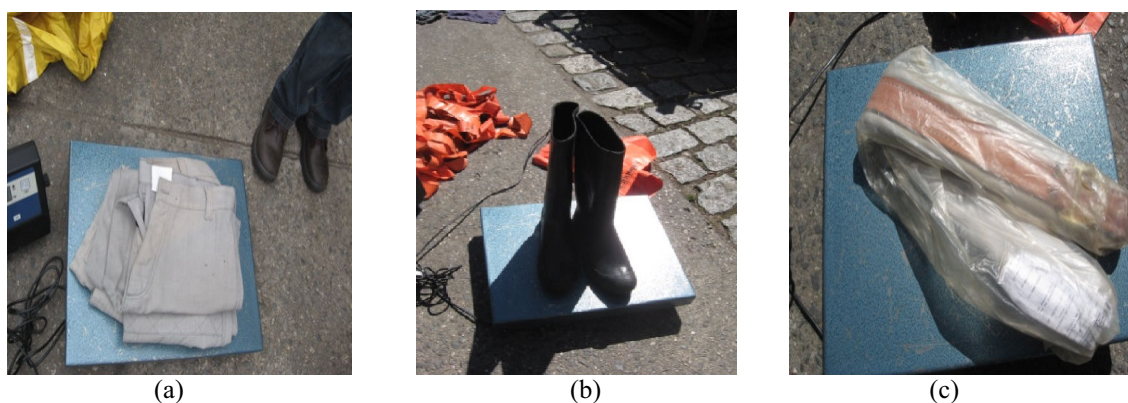


Figura 29 – Resíduos de EPIs/EPCs considerados em bom estado: (a) calça de tecido cinza, (b) bota de borracha e (c) cinto de couro ainda na embalagem.

Ao longo de todas as separações realizadas, não só dos EPIs/EPCs, como também de todos os outros itens, foram observados vários casos de produtos aparentemente sem uso sendo descartados. Isso se denotava pela aparência (por exemplo, abraçadeiras tão brilhantes quanto as novas) e em muitos casos até mesmo pela embalagem presente (como no caso do cinto da Figura 29c). No caso de isoladores encontrou-se isopor presente onde a ferragem, no caso de utilização, teria sido rosqueada. Estes exemplos representam um desperdício inaceitável de recursos financeiros e naturais que deve ser combatido com programas de conscientização dos funcionários para uma segregação mais eficiente na fonte geradora. Pouco ou nada pode ser feito a partir do momento em que entram no galpão, pois ali são considerados resíduos e dada a grande movimentação de caçambas, gaiolas e caminhões de fornecedores e clientes, não há mão de obra, estrutura e tempo hábil para uma separação pós-geração.

5.4 Avaliação do Potencial de Reciclagem dos Resíduos

5.4.1 Ensaio com materiais cerâmicos

5.4.1.1 Microscopia eletrônica de varredura acoplada à espectroscopia de energia dispersiva

A Figura 30 apresenta micrografias de superfícies fraturadas do biscoito das cerâmicas utilizadas em isoladores marrons e cinzas, tanto novos quanto usados.

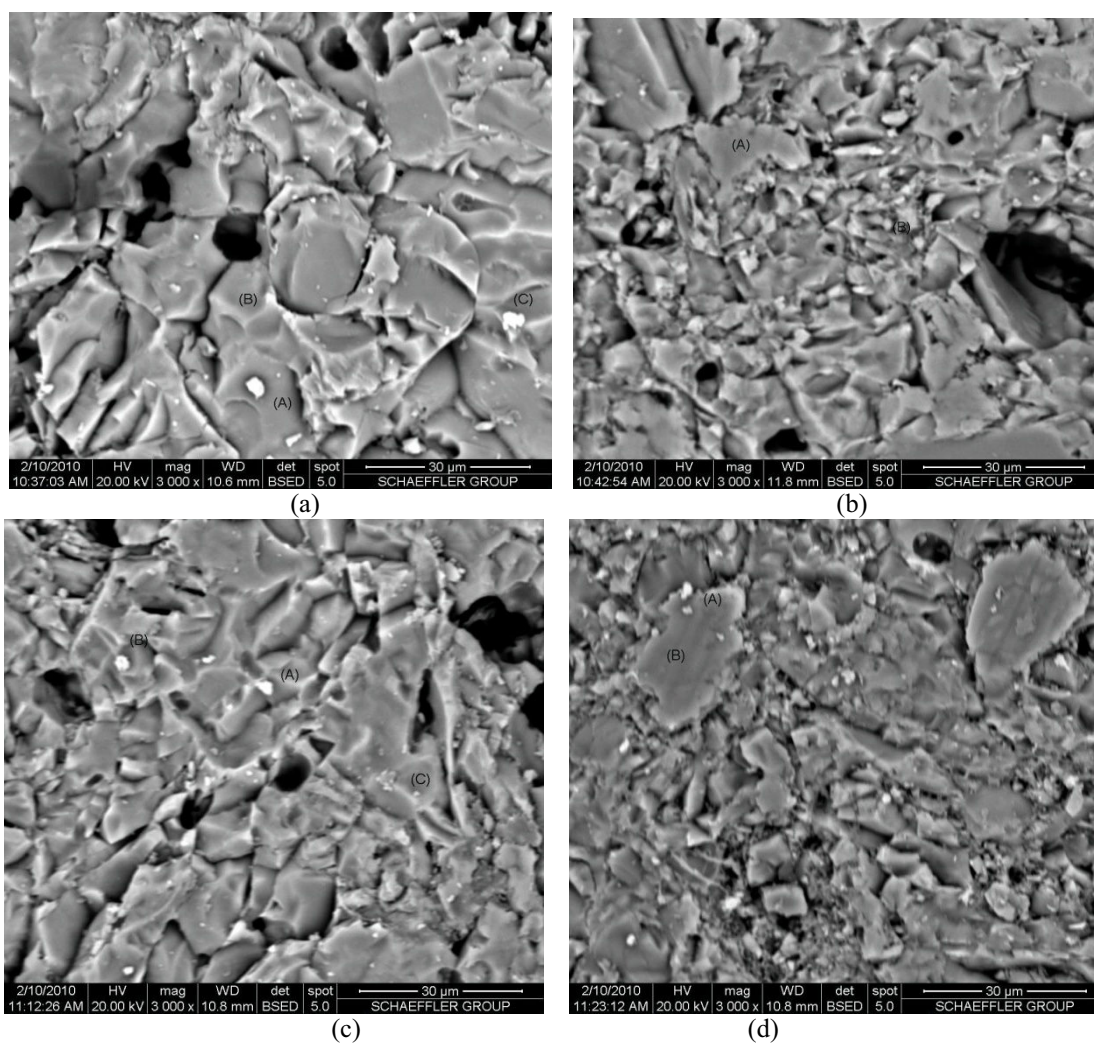


Figura 30 - Micrografia da superfície do biscoito de amostras de cerâmica (imagem obtida originalmente com aumento de 3.000 vezes): (a) marrom nova, (b) marrom usada, (c) cinza nova e (d) cinza usada.

As superfícies das amostras também foram analisadas quanto a sua composição química através da obtenção de espectros de raios-X. A Figura 31 apresenta o espectro obtido para a amostra de cerâmica marrom nova. Espectros semelhantes foram obtidos para as quatro amostras e as composições em peso de cada elemento foram calculadas pelo equipamento e apresentadas na Tabela 17.

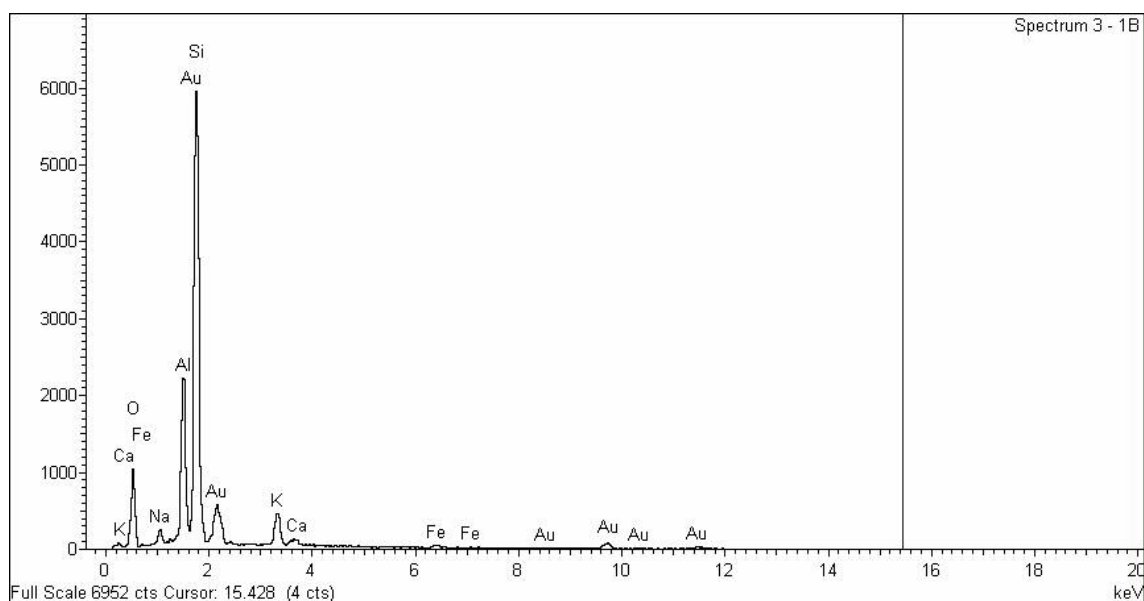


Figura 31 - Espectro obtido para a amostra de cerâmica marrom nova.

Tabela 17 - Composição química da matriz das amostras do biscoito de cerâmicas marrom e cinza, nova e usada, da Figura 30.

Elementos	Cerâmica Marrom		Cerâmica Cinza	
	Nova	Usada	Nova	Usada
	% em peso			
Oxigênio	49,52	47,98	41,68	38,16
Sódio	1,09	0,55	0,92	0,62
Alumínio	4,12	5,44	9,68	15,4
Silício	11,4	37,55	34,77	33,13
Potássio	1,13	2,30	4,24	3,58
Cálcio	12,16	-	-	1,34
Ferro	—	0,42	0,85	-
Carbono	9,21	-	-	-

Na Figura 30 são observados visualmente, grãos com tamanho médio de aproximadamente 30 μm , sendo que os poros provavelmente tratam-se de grãos removidos durante o processo de fratura. Observa-se uma microestrutura densa e homogênea, sem alterações significativas nas superfícies, seja em relação à comparação entre novo e usado, seja na comparação entre marrom e cinza.

Os elementos que apareceram em maior quantidade foram o oxigênio, o silício e o alumínio, conforme esperado pois as cerâmicas são basicamente compostas por sílicas (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), como já mencionado. O ferro detectado é um contaminante natural da argila, já o sódio e o potássio são provavelmente provenientes do feldspato e fundentes. Vale lembrar que a técnica de EDS via MEV é considerada semi-quantitativa, de modo que as comparações das quantidades fornecidas pelo equipamento não são consideradas precisas. Porém, esses resultados são considerados bastante confiáveis para comparações, principalmente com relação à presença/ausência de determinado elemento.

Dessa forma, pela Tabela 17 observa-se a presença de cálcio e carbono nas amostras novas de cerâmica marrom e ausência nas usadas. Com esses resultados não é possível afirmar que as diferenças de elementos encontrados sejam devido a eventuais deposições e/ou degradações durante o uso das porcelanas descartadas, até porque os elementos presentes/ausentes são diferentes nas amostras marrons e cinzas, submetidas a condições de uso similares. Isso indica que a diferença observada pode estar associada à: mudanças de formulação, matéria-prima, lote, fabricante da porcelana etc.

A Figura 32 apresenta imagens de ampliações de 1.000 vezes da superfície dos esmaltes das cerâmicas dos isoladores marrom e cinza, novos e usados. A Tabela 18 apresenta os resultados das análises de composição química por raios-X (EDS via MEV) das amostras da Figuras 32.

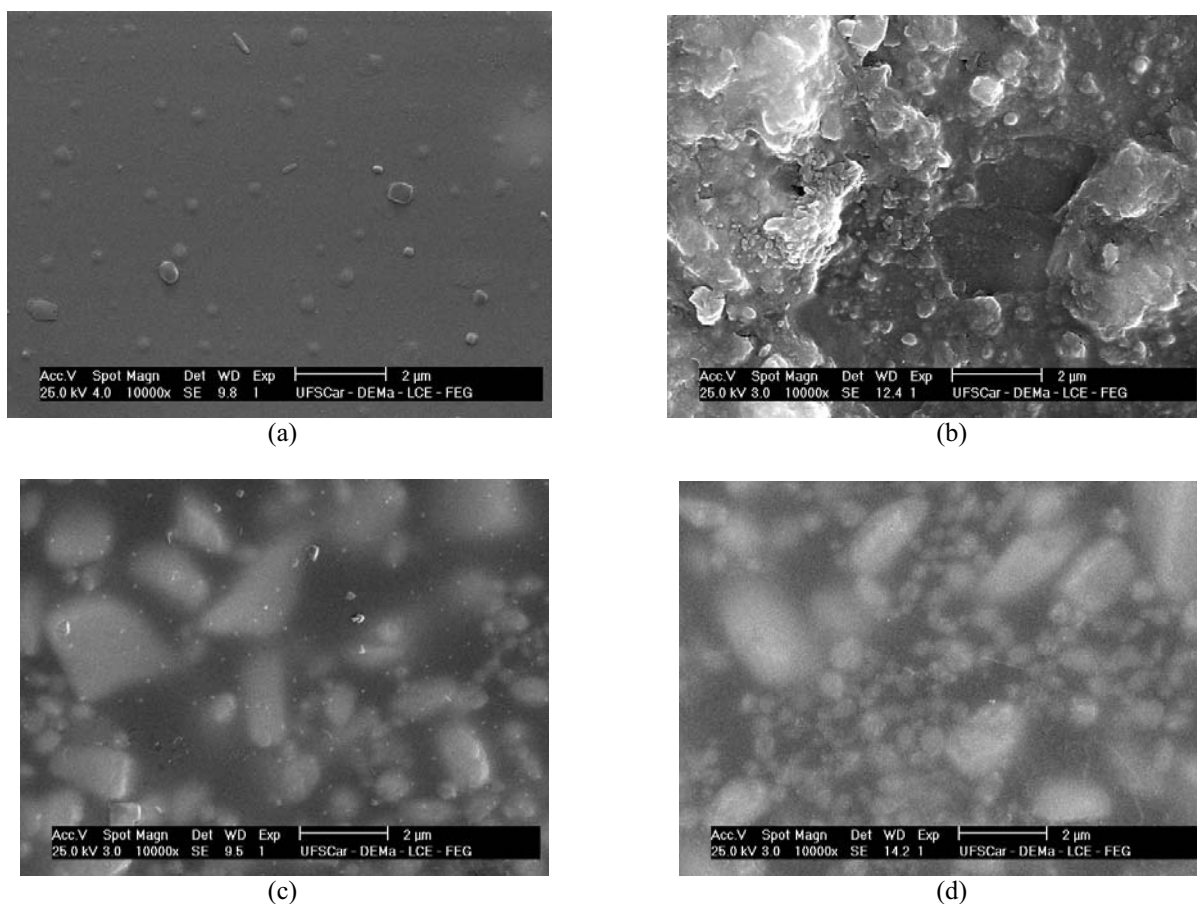


Figura 32 - Micrografia da superfície do esmalte de amostras de cerâmica (imagem obtida originalmente com aumento de 1.000 vezes): (a) marrom nova, (b) marrom usada, (c) cinza nova e (d) cinza usada.

Tabela 18 - Composição química das amostras do esmalte das cerâmicas marrom e cinza, nova e usada, da Figura 32.

Elementos	Cerâmica Marrom		Cerâmica Cinza	
	Nova	Usada	Nova	Usada
	% em peso			
Oxigênio	25,23	52,47	36,64	24,19
Potássio	7,06	2,17	3,69	4,50
Silício	55,77	22,87	38,20	42,49
Alumínio	8,21	4,62	5,04	5,41
Sódio	0,65	0,78	—	—
Ferro	2,27	6,23	0,11	0,82
Cromo	0,81	0,91	—	—
Cálcio	—	3,70	3,97	5,61
Manganês	—	1,83	—	—
Magnésio	—	1,47	—	—
Zircônio	—	2,97	12,35	16,98

Pela Figura 32 observam-se diferenças entre as imagens novas e usadas, apesar de nenhuma delas apresentarem visualmente trincas ou intrusões, podendo ser consideradas vidrados de alta homogeneidade. Observou-se formação de cristais, provavelmente de zircão (ZrSiO_4), conforme resultado de zircônio apresentado na Tabela 18. O zircão é comumente utilizado em vidrados para melhorar a resistência à abrasão e como opacificante (coloração branca), o que explica ter sido encontrado (quando encontrado) em menor quantidade no esmalte marrom, em que pese o caráter semi-quantitativo da espectroscopia de energia dispersiva utilizada (APARISI et al, 2001 & SORLI et al, 2005).

Em termos de composição, de acordo com os resultados apresentados na Tabela 18, observam-se poucas diferenças entre a superfície do esmalte das amostras cinza e marrom, novas e usadas. As amostras apresentam oxigênio, potássio, silício, alumínio e ferro, o que já era esperado para um esmalte cerâmico. Carbono não foi detectado. Se fosse detectado nas usadas, poderia ser indício de impregnação de fuligem do ar. O sódio, que também poderia indicar o contato do isolador com o ambiente (poluição salínica), foi encontrado apenas nas amostras de coloração marrom, o que sugere sua presença na formulação e não por contato com o ambiente.

5.4.1.2 Ângulo de contato

A Figura 33a apresenta o comportamento de uma gota de água depositada na superfície de uma amostra de porcelana. Comportamento semelhante foi observado também para a amostra usada, bem como para as amostras metálicas. A título de comparação, a Figura 33b apresenta o comportamento de uma gota de água depositada na superfície de uma amostra de polímero. Enquanto que nas amostras metálicas e cerâmicas nota-se a atração da água pela superfície (característica hidrofílica), observa-se na superfície polimérica um comportamento hidrofóbico, com a água mostrando uma tendência de repulsão à superfície.

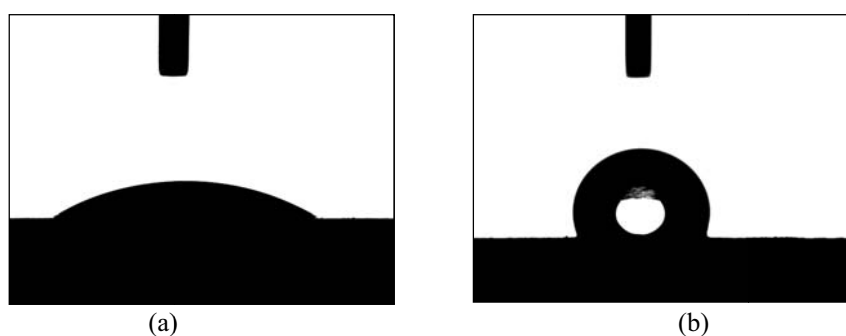


Figura 33 - Imagem das gotas depositadas sobre a superfície do isolador: (a) biscoito da cerâmica cinza nova e (b) do polímero usado.

Os resultados dos ensaios de ângulo de contato das amostras do biscoito dos isoladores cerâmicos estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Resultados de ângulo de contato para as amostras do biscoito e esmalte dos isoladores cerâmicos.

Amostra			Ângulo de contato, °
Cinza	Biscoito	Nova	$77,39 \pm 9,33$
		Usada	$53,46 \pm 13,45$
	Esmalte	Nova	$58,97 \pm 2,06$
		Usada	$47,95 \pm 2,23$
Marrom	Biscoito	Nova	$60,22 \pm 18,45$
		Usada	$31,31 \pm 5,49$
	Esmalte	Nova	$42,29 \pm 5,02$
		Usada	$89,04 \pm 10,89$

Verifica-se pelos resultados de ângulo de contato que todas as amostras cerâmicas possuem característica hidrofílica (ângulo de contato menor que 90°). Característica esta explicada pela composição química do material, que é constituído por cadeias inorgânicas, ou seja, que possuem comportamento polar e por consequência, afinidade pela água. Além disso, as superfícies esmaltadas das cerâmicas possuem aditivos inorgânicos, que colaboram com o comportamento hidrofílico (PRETTE, 2007).

Embora os valores de desvios padrão possam ser considerados altos e inviabilizem o estabelecimento de tendências precisas, nota-se que as médias dos valores de ângulo de contato são maiores para as amostras de produtos novos. A única exceção é o

esmalte da amostra usada de cerâmica marrom, justamente o material que apresenta uma composição química mais distinta, de acordo com a Tabela 17 (o único em que se detectou manganês e magnésio). A diminuição dos valores de ângulo de contato pode ter origem em eventuais impregnações durante o uso, apesar das amostras terem sofrido uma limpeza superficial anteriormente ao ensaio (Tabela 19). O mais provável, até pelo armazenamento pouco cuidadoso dos isoladores descartados (uns sobre os outros em gaiolas metálicas) é que existam ranhuras no esmalte, o que também, assim como a deposição de inorgânicos, tenderia a aumentar a hidrofobicidade (GIANELLI, 2008, PRETTE, 2007).

5.4.1.3 Densidade relativa por líquido deslocado

Os resultados da determinação da densidade relativa por líquido deslocado das amostras novas e usadas do biscoito dos isoladores de porcelana estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 - Resultados da determinação da densidade relativa por líquido deslocado das amostras de biscoitos dos isoladores de porcelana, novo e usado.

Amostra		Densidade relativa	DP
Marrom	Nova	2,350	0,004
	Usada	2,350	0,004
Cinza	Nova	2,350	0,001
	Usada	2,330	0,010

Através dos resultados da Tabela 20 não se pode afirmar que os isoladores cerâmicos, em sua parte mais interna (biscoito) tenham sofrido quaisquer degradações durante o uso, pois os resultados são praticamente idênticos.

5.4.1.4 Teor de voláteis

Os resultados do ensaio de teor de voláteis nas amostras do biscoito dos isoladores estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Resultados de teor de voláteis para as amostras de cerâmica.

Amostra		Teor de voláteis, % (p/p)
Marrom	Nova	0,24
	Usada	0,30
Cinza	Nova	0,34
	Usada	0,07

Observa-se pela Tabela 21 que o teor de voláteis sempre forneceu resultados bastante baixos para todas as amostras, menor que 0,5%, como esperado. As diferenças observadas devem ter origem em erros experimentais e também não permitem conclusões a respeito de eventuais efeitos do uso.

5.4.1.5 Difração de raios-X

A Figura 34 apresenta as curvas de raios-X obtidas no ensaio de difração por raios-X para as amostras do biscoito dos isoladores de porcelana cinza e marrom, novo e usado.

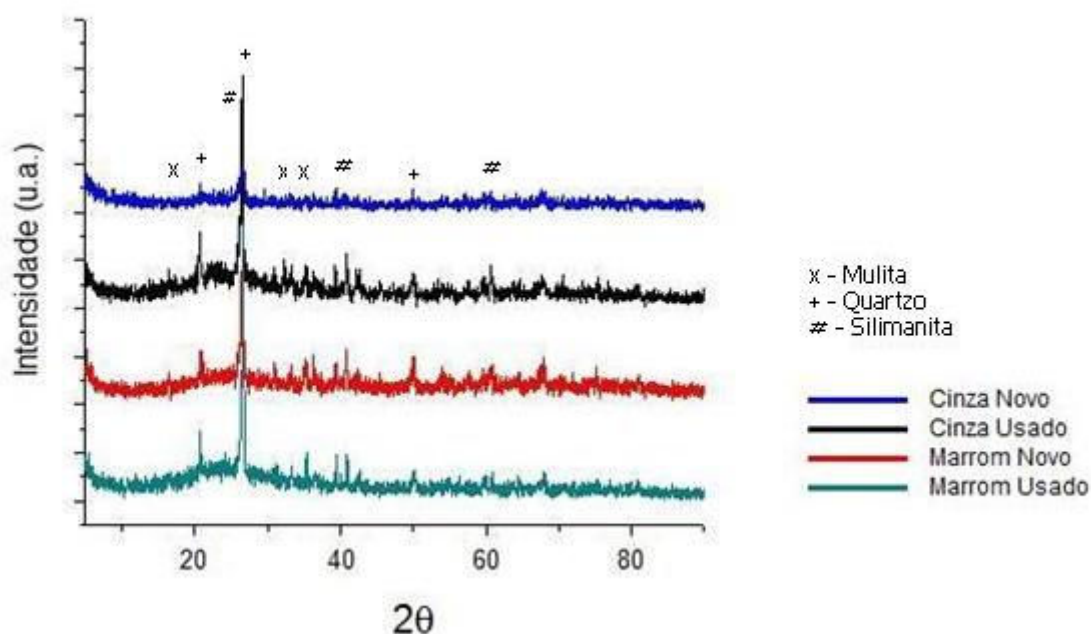


Figura 34 - Espectros obtidos por difração de raios-X para as amostras cerâmicas.

Observa-se pelas curvas de raios-X da Figura 34 níveis apreciáveis de ruído, o que mostra a provável presença de fases amorfas (vítreas) provenientes da reação de sinterização da sílica (SiO_2) e dos fundentes (sódio e potássio, principalmente) contidos na massa cerâmica. Esses elementos também foram detectados pelo ensaio de EDS via MEV (Tabelas 17 e 18).

Este fato também fornece um forte indício que ocorreu a sinterização via fase líquida durante a queima do produto, o que confere elevada densidade e baixos níveis de porosidade, características necessárias para as cerâmicas de isoladores.

Foram identificadas pelo programa do equipamento, as fases de quartzo, sillimanita e mulita em todas as amostras. A fase de quartzo (SiO_2) possui estrutura hexagonal, a do tipo sillimanita ($\text{Al}_2\text{SiO}_5/\text{Al}_2\text{O}_3.\text{SiO}_2$) e mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2$) possuem estrutura ortorrômbica. Como os difratogramas são semelhantes, conclui-se que não houve alterações significativas nas amostras do biscoito com o uso. Não se verificou também diferenças importantes entre as amostras de coloração marrom e cinza, apesar de algumas diferenças detectadas nos ensaios de EDS via MEV, portanto provavelmente estes dois materiais podem ser misturados numa eventual recuperação conjunta.

5.4.1.6 Porosimetria por intrusão de mercúrio

Não foi observada penetração do mercúrio nos poros de todas as amostras de biscoito dos isoladores cinza e marrom, novo e usado. Ou seja, as amostras não apresentaram porosidade aberta. Este resultado já era esperado para isoladores elétricos, pois a umidade eventualmente absorvida nos poros compromete as características de isolamento. Através destes resultados da parte interna da cerâmica (biscoito), verifica-se que o esmalte cumpriu a sua função, protegendo o isolador de uma eventual absorção de água. Observou-se que o uso dos isoladores cerâmicos provavelmente não afetou a sua porosidade, uma vez que as amostras usadas também não apresentaram porosidade aberta.

5.4.1.7 Dilatometria

A Figura 35 apresenta a curva de expansão térmica obtida para a amostra do biscoito da porcelana marrom nova, sendo que as curvas para o biscoito da porcelana marrom usada, bem como da cinza, nova e usada, apresentaram formato bastante semelhante. Os coeficientes de expansão térmica linear de cada material são apresentados na Tabela 22.

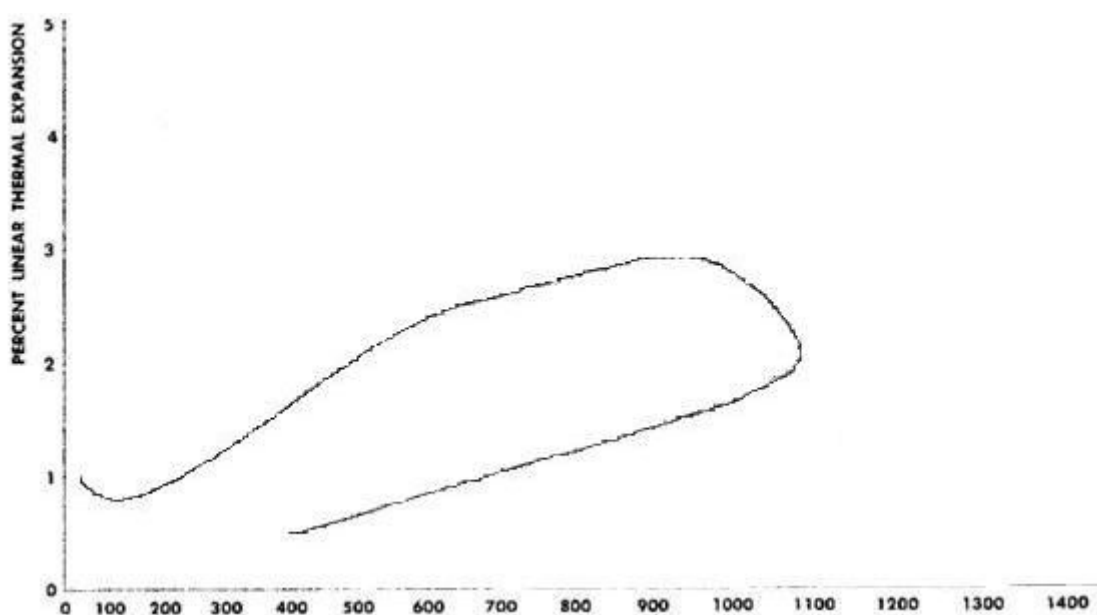


Figura 35 - Curva de expansão térmica da cerâmica marrom nova.

Tabela 22 - Coeficiente dilatométrico (α) para as amostras de cerâmica.

Amostra		$\alpha \times (10^{-6}), ^\circ\text{C}^{-1}$
Marrom	Nova	5,25
	Usada	5,37
Cinza	Nova	5,12
	Usada	5,75

Pela Figura 35 é possível observar a expansão e a retração do material durante o aumento de temperatura até 1.100 °C. Próximo a temperatura de 900 °C ocorre a estabilização da expansão e o início da contração, característico da transformação da tridimita para o quartzo β e posteriormente para o quartzo α . As fases se mostraram estáveis, revelando uma sinterização bem feita no processo de fabricação dos isoladores.

Na Tabela 22 é possível observar um pequeno aumento no coeficiente de expansão linear das amostras usadas em relação às amostras usadas. Essa diferença é bastante pequena, em torno de $10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, e provavelmente não tem relação com o seu uso e sim com as diferenças de formulação, lote, fabricante, processo etc (observadas também pelos ensaios de EDS via MEV, Tabelas 17 e 18). Os valores de coeficiente dilatométrico são bastante pequenos, mostrando que as peças apresentam uma boa estabilidade dimensional, o que é particularmente interessante quando se pensa na recuperação do material para fins de reciclagem.

5.4.1.8 Conclusões preliminares sobre a reciclabilidade dos materiais cerâmicos descartados

Os resultados obtidos indicam que os resíduos cerâmicos dos isoladores do sistema de distribuição de energia elétrica são bastante similares às peças novas. Isso sugere que estudos bastante rigorosos sobre reutilização possam ser conduzidos, com o objetivo de se verificar a possibilidade de se evitar o descarte de pelo menos uma parcela de produtos que eventualmente ainda apresentem condições de uso.

As pequenas diferenças encontradas entre os materiais novos e usados sugerem que provavelmente estavam sendo comparados materiais diferentes, advindos de

fornecedores, matérias-primas, formulações e processos diferentes, mas que fornecem produtos que atendem as especificações técnicas. Já as diferenças entre cerâmicas marrom e cinza parecem se concentrar somente na cor do esmalte, uma vez que as propriedades dos biscoitos foram sempre muito próximas.

O fato das peças usadas apresentarem propriedades bastante similares às novas é um atrativo para a indústria da reciclagem, embora para cerâmica isso deva ser relativizado. É pouco provável a reciclagem dos isoladores após a separação das ferragens a eles acopladas, em virtude de possuírem mercado bastante incipiente, por apresentar recuperação complexa e reciclado com propriedades relativamente pobres. Porém, duas alternativas parecem ser interessantes para este material: 1) serem utilizados integralmente, aproveitando-se as ótimas propriedades mecânicas que o isolador possui, por exemplo, para enchimento de terrenos, apoio a encostas etc; e 2) serem utilizados como chamote, (agregados, por exemplo, para a construção civil), principalmente devido à grande estabilidade dimensional e química das peças.

5.4.2 Ensaaios com materiais poliméricos

5.4.2.1 Microscopia eletrônica de varredura acoplada à espectroscopia de energia dispersiva

A Figura 36 apresenta imagens de amostras do polímero de isoladores novo e usado. Observam-se nas duas figuras texturas semelhantes constituídas de uma matriz e incrustações, investigadas pontualmente quanto a sua composição química através de espectroscopia de raios-X, cujos resultados estão apresentados na Tabela 23. Nas duas

imagens da Figura 36 os pontos B são relativos à matriz do material e os pontos A são relativos às pequenas incrustações (as grandes incrustações observadas no canto superior esquerdo da Figura 36b são regiões da matriz com relevo mais elevado).

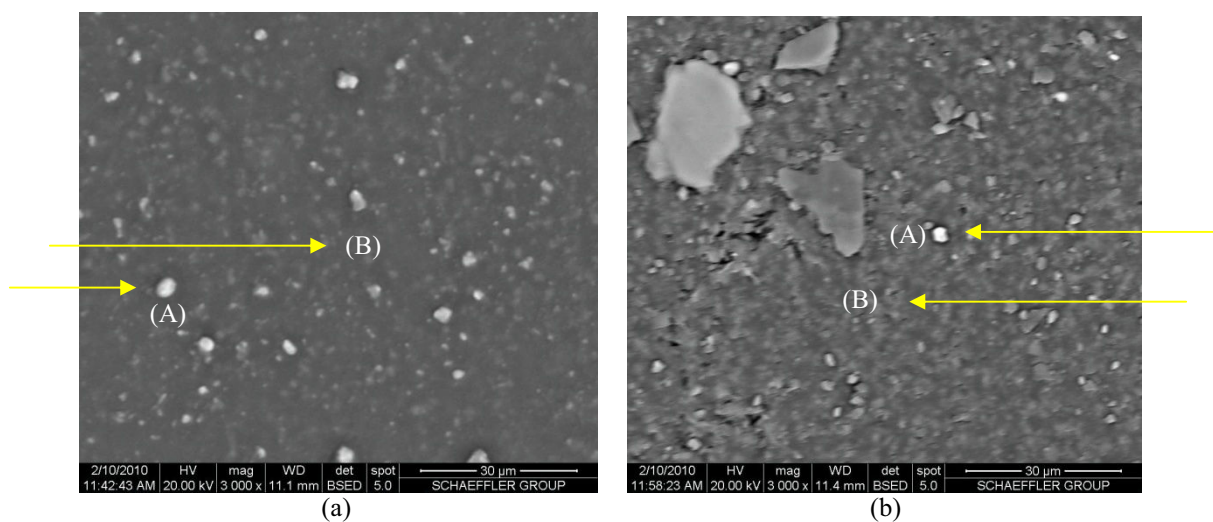


Figura 36 - Micrografias da superfície das amostras de polímero (imagem obtida originalmente com aumento de 3.000 vezes): (a) novo e (b) usado.

Tabela 23 - Composição química das amostras de polímero nos pontos destacados na Figura 36.

Elementos	Polímero novo		Polímero usado	
	Peso (%)			
	Ponto A	Ponto B	Ponto A	Ponto B
Carbono	38,73	19,38	14,13	15,10
Oxigênio	19,39	18,93	40,45	31,04
Silício	12,57	39,39	15,51	29,37
Alumínio	0,48	5,18	4,93	8,72
Cálcio	14,33	—	—	—
Titânio	—	—	13,86	5,66
Ferro	—	—	2,44	10,11

A composição química das matrizes (pontos B) tanto da amostra nova quanto da usada confirma que o polímero do isolador é o elastômero de silicone, pela presença majoritária de carbono, oxigênio e principalmente silício. Percebe-se pelos resultados apresentados na Tabela 23, que nas incrustações aparece uma maior quantidade de elementos estranhos ao elastômero de silicone e nos isoladores novos não foram detectados os elementos titânio e ferro, mas sim o cálcio. Não é possível afirmar que o titânio e ferro presentes nas amostras usadas sejam provenientes de contaminações ambientais comumente reportadas. A diferença de composição entre os isoladores novos e usados deve se relacionar a composições diferentes da matéria-prima inicial, em especial aditivos incorporados, como pigmentos e cargas. A adição de aditivos explica a maior concentração de elementos que não silício, carbono e oxigênio nas incrustações, pois há a tendência de segregação preferencial dos aditivos para fora da fase polimérica. Por exemplo, o alumínio, detectado na amostra nova e na usada, provavelmente se relaciona à alumina trihidratada (ATH), aditivo comumente incorporado à formulação de isoladores poliméricos para aumentar a resistência à chama destes produtos (COSER, 2009).

Como trata-se de um ensaio semi-quantitativo, a variação apresentada nos valores de carbono, oxigênio e silício das matrizes pode não estar relacionada com um processo de degradação do polímero usado em relação ao novo. Isto porque a cadeia principal do silicone é formada de silício, apresentando ramificações à base de carbono, sítio das prováveis degradações iniciais que poderiam ocorrer no polímero (MANO, 2004).

5.4.2.2 Ângulo de contato

Os resultados dos ensaios de ângulo de contato dos isoladores poliméricos estão apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 - Resultados de ângulo de contato para as amostras de isoladores poliméricos.

Amostra	Ângulo de contato, °
Nova	107,03 ± 2,21
Usada	98,71 ± 3,70

Verifica-se pela Tabela 24 que as amostras poliméricas possuem características hidrofóbicas (ângulo de contato maior que 90°), conforme já registrado na literatura. Um dos motivos para este comportamento é a composição química do polímero, que possui cadeias carbônicas, tipicamente apolares e repelentes à água (PRETTE, 2007).

Pode-se observar que os resultados de ângulo de contato dos isoladores sofreram desvios da ordem de 2 a 3°. Descontadas essas variações, as diferenças entre a amostra nova e a usada não podem ser consideradas significativas a ponto de serem explicadas por degradações ocorridas durante o uso. Porém, considerando-se somente a média nota-se que os valores para os isoladores usados têm seu valor de ângulo de contato diminuído, o que se caracteriza na diminuição da hidrofobicidade. A mesma explicação dada para o caso dos isoladores cerâmicos vale para os poliméricos: é pouco provável que a diminuição da hidrofobicidade seja por conta de deposições na superfície, pois não foram detectadas diferenças significativas pelo EDS via MEV. É mais provável que esteja ligada a uma degradação imperceptível a olho nu e que se caracterize por microtrincas na superfície do

isolador, onde a água pode penetrar. Outro motivo para estas diferenças no ângulo de contato das amostras nova e usada são a comparação entre materiais diferentes, formulações diferentes, fornecedores diferentes etc, e que portanto fornecerão resultados diferentes.

5.4.2.3 Densidade relativa por líquido deslocado

Os resultados da determinação da densidade relativa por líquido deslocado das amostras novas e usadas dos isoladores estão apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 – Resultados de densidade relativa por líquido deslocado das amostras nova e usada dos isoladores poliméricos.

Amostra	Densidade relativa	DP
Nova	1,517	0, 002
Usada	1,549	0, 013

Verifica-se pelos resultados da Tabela 25 que as amostras usadas de isoladores de borracha de silicone apresentaram valores de densidade relativa maiores que as amostras novas. Apesar de não se poder afirmar que se tratam exatamente do mesmo *grade* de material (por exemplo mesma massa molar, grau de reticulação, aditivos etc), estes resultados podem indicar algum processo de degradação, em especial na superfície exposta ao ultravioleta, oxigênio e água dos isoladores usados. Tratam-se de agentes sabidamente degradativos para

polímeros, que podem quebrar cadeias, sem necessariamente impactar em mudança de composição detectável por EDS via MEV, por exemplo (REICH & STIVALA, 1971).

Como a temperatura ambiente está acima da temperatura de transição vítrea do elastômero de silicone utilizado (ver ensaio de calorimetria de varredura diferencial, item 5.4.2.9), durante o uso há energia térmica suficiente para que essas cadeias menores se recombinem com as maiores, aumentando a densidade e a cristalização (ANJOS, 2007).

5.4.2.4 Teor de cinzas

Os resultados do ensaio de teor de cinzas nas amostras de polímero do isolador estão apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 - Resultados de teor de cinzas para as amostras de polímero.

Amostra	Teor de cinzas, % peso
Nova	$58,0 \pm 1,8$
Usada	$62,2 \pm 3,7$

Verificou-se pelos resultados da Tabela 26 que as amostras apresentam um alto teor de cinzas, mais que a metade do seu peso inicial, o que é coerente com o elastômero de silicone pelo fato de sua cadeia principal não ser à base de carbono e sim de silício. Outra observação é que o teor de cinzas da amostra usada é maior que o da amostra nova, o que a

princípio poderia estar relacionado à deposições de inorgânicos durante o uso. Como essa hipótese já foi descartada (itens 5.4.2.1 e 5.4.2.2), a diferença entre as amostras provavelmente são devidas ao fato de estarem sendo comparados matérias-primas diferentes.

5.4.2.5 Identificação por queima e fumaça

Durante a queima do polímero dos isoladores na chama do bico de Bunsen houve liberação de fumaça branca e o resíduo gerado com o término da queima apresentou-se de coloração branca, conforme a Figura 37. Isto ocorreu tanto para as amostras novas, como para as amostras usadas, confirmando a sua provável identificação como elastômero de silicone (MARK, 1999). Como já comentado, não se trata de uma identificação precisa, porém apresenta procedimento simples de ser realizado em equipamentos baratos. Ainda, dado que se suspeitava do silicone ou do elastômero de etileno-propileno (polímeros comumente empregados em isoladores), o ensaio mostrou-se bastante eficiente.



Figura 37 - Amostras de polímero após queima no bico de Bunsen.

5.4.2.6 Identificação por espectrofotometria no infravermelho

Espectros típicos dos resultados do ensaio de espectrofotometria no infravermelho do polímero estão apresentados na Figura 38. Foram obtidos espectros de 6 amostras de um isolador novo e 6 amostras de 4 usados.

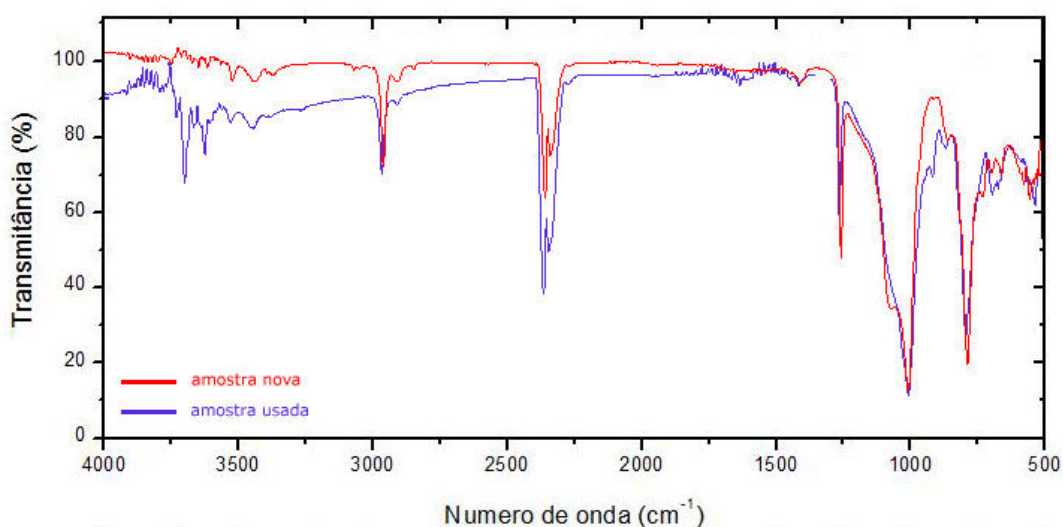


Figura 38 - Espectros de infravermelho sobrepostos de uma amostra nova e uma amostra usada do isolador.

Pelos espectros obtidos verifica-se a presença de bandas de absorção no infravermelho características do polidimetilsiloxano, mais especificamente dos grupos (MARK, 1999):

- $-\text{Si}(\text{CH}_3)_2\text{-O-Si}(\text{CH}_3)_2-$ em $2905 - 2960 \text{ cm}^{-1}$, 1020 cm^{-1} e 1090 cm^{-1} ;
- $\text{Si}(\text{CH}_3)_3$ em $2905 - 2960 \text{ cm}^{-1}$, 1250 cm^{-1} , 840 cm^{-1} e 765 cm^{-1} ;
- $\text{Si}(\text{CH}_3)_2$ em $2905 - 2960 \text{ cm}^{-1}$, 1260 cm^{-1} , 855 cm^{-1} e 805 cm^{-1} ;
- Si-CH_3 em $2905 - 2960 \text{ cm}^{-1}$, $1245 - 1275 \text{ cm}^{-1}$ e $760 - 845 \text{ cm}^{-1}$;
- Si-H em $2100 - 2300 \text{ cm}^{-1}$ e $760 - 910 \text{ cm}^{-1}$;
- Si-OH em 3695 cm^{-1} , $3200 - 3400 \text{ cm}^{-1}$ e $810 - 960 \text{ cm}^{-1}$;
- Si-CH=CH_2 em $1590 - 1610 \text{ cm}^{-1}$, 1410 cm^{-1} , $990 - 1020 \text{ cm}^{-1}$ e $940 - 980 \text{ cm}^{-1}$.

Como na empresa só há elastômeros de silicone e EPDM, pode-se concluir com precisão que o polímero do isolador é o elastômero de silicone.

Pela comparação entre os espectros não se verifica diferença significativa entre as amostras nova e usada, muito menos que tenha ocorrido alguma degradação importante no polímero usado que afetasse a sua estrutura a ponto de modificar o seu espectro no infravermelho.

5.4.2.7 Solubilidade

Os resultados dos testes de solubilidade para a amostra usada e nova estão apresentados na Tabela 27 para solventes típicos do dimetilsiloxano.

Tabela 27 - Resultados dos testes de solubilidade para as amostras de elastômero de silicone de isolador novo e usado.

Solvente	Amostra	Solubilidade
Acetato de etila	Nova	Praticamente insolúvel ou insolúvel
	Usada	
Clorofórmio	Nova	Praticamente insolúvel ou insolúvel
	Usada	
Éter etílico	Nova	Praticamente insolúvel ou insolúvel
	Usada	
Tolueno	Nova	Praticamente insolúvel ou insolúvel
	Usada	
Xileno	Nova	Praticamente insolúvel ou insolúvel
	Usada	

Verificou-se pelos ensaios de solubilidade, resumidos na Tabela 27, que o polímero empregado nos isoladores testados não é solúvel em nenhum dos solventes testados. Se fosse uma versão sem ligações cruzadas de dimetilsiloxano, algum sinal de dissolução teria ocorrido. Como os ensaios de Identificação por Queima e Fumaça (item 5.4.2.5) e Espectroscopia na Região do Infravermelho (item 5.4.2.6) determinaram que o polímero em questão é o silicone e como não foi apontada a solubilidade em solventes típicos, tem-se fortes indícios de que se trata de uma versão elastomérica do silicone. Desta maneira, a despeito de outros solventes que possam ser testados, provavelmente este material não poderá, assim como ocorre com os elastômeros de uma maneira geral, ser reciclado mecanicamente.

Portanto, resta para este material a reciclagem química, a partir da quebra química e/ou térmica das ligações cruzadas ou, em último caso, a reciclagem energética (queima para aproveitamento do potencial calorífico). Esta impossibilidade de reciclagem via fusão ocorre devido ao processo de vulcanização do elastômero, ou seja, há ligações intermoleculares covalentes que dificultam e/ou impedem a separação molecular que ocorre na fusão (item 2.3).

5.4.2.8 Análise termogravimétrica

A Figura 39 apresenta as curvas termogravimétricas de amostras de isoladores poliméricos novo e usado. A Tabela 28 apresenta os principais resultados do ensaio.

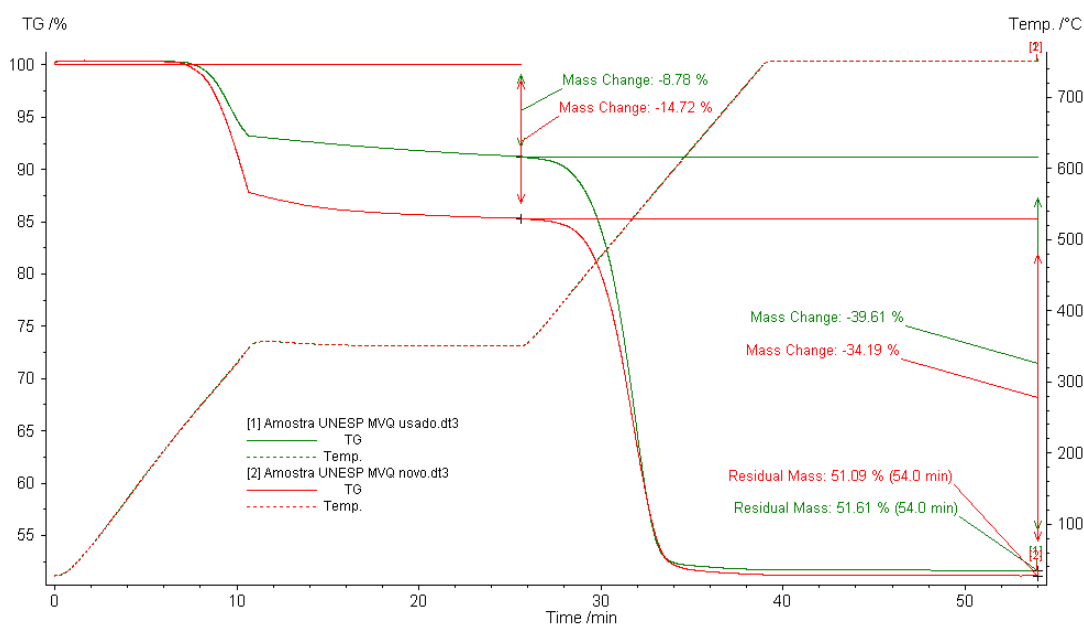


Figura 39 - Curvas termogravimétricas das amostras de isoladores poliméricos novo (vermelho) e usado (verde).

Tabela 28 - Resultados do ensaio termogravimétrico das amostras de isoladores poliméricos novo e usado.

Amostra	Isoterma a 350 °C	Isoterma a 750 °C	Massa Residual (%)
	Perda de Massa, %	Perda de Massa, %	
Nova	14,72	34,19	51,09
Usada	8,78	39,61	51,61

Observa-se pela curva da Figura 39 e pelos resultados da Tabela 28 que as amostras de silicone novo e usado possuem comportamento semelhante em função do aquecimento. A primeira grande perda de massa, na isoterma a 350 °C, pode ser atribuída à saída dos elementos mais voláteis, principalmente a degradação da alumina trihidratada (COSER, 2009). Já a perda de massa a 750 °C provavelmente refere-se à saída de todo o carbono da estrutura. Observa-se que a amostra usada apresenta uma termoestabilidade superior, perdendo menos massa a 350 °C. Posteriormente, na segunda grande perda de massa a amostra nova é mais estável. Essa diferença de comportamento traduz-se, ao final do ensaio, em materiais bastante similares, com massas residuais de cerca de 51%, valor que está coerente com o obtido no ensaio do teor de cinzas (item 5.4.2.4). É possível que a termoestabilidade superior da amostra usada em temperaturas mais baixas se relacione com a maior cristalinidade da mesma, apontada no ensaio de densidade relativa (5.4.2.3). Nas discussões sobre os resultados deste ensaio, associou-se o aumento da densidade da amostra usada em relação a nova a eventuais processos degradativos sofridos pelo material polimérico durante o uso. Como a temperatura ambiente é superior à temperatura de transição vítrea do material (DSC, item 5.4.2.9) houve, durante o uso, energia térmica suficiente para que as cadeias menores geradas num eventual processo degradativo se acomodassem de maneira mais organizada com as cadeias maiores, o que traduz-se num aumento de cristalinidade. As regiões cristalinas são mais estáveis termicamente, pois representam uma maximização da atração molecular em termos de forças químicas envolvidas e uma minimização do espaço ocupado, demandando mais energia para sua separação. Em temperaturas superiores, da ordem de 750 °C, toda organização polimérica é destruída, tendendo a um resíduo semelhante para materiais semelhantes, independente do arranjo a temperaturas inferiores.

5.4.2.9 Calorimetria de varredura diferencial

A Figura 40 apresenta as curvas de calorimetria de varredura diferencial das amostras nova e usada do isolador polimérico e a Tabela 29 os resultados do ensaio.

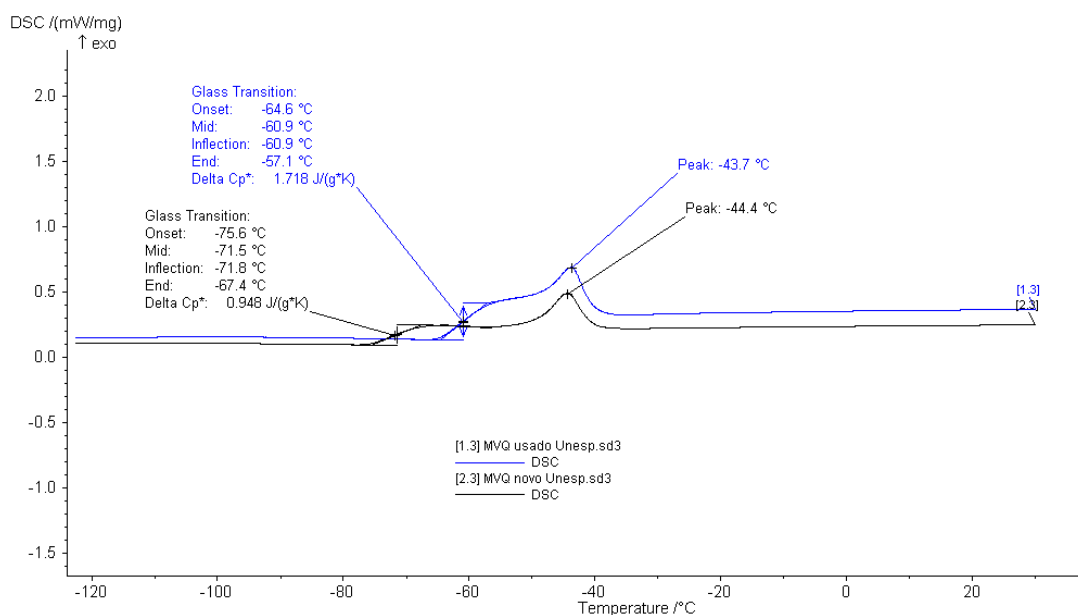


Figura 40 - Curvas de DSC das amostras de elastômero de silicone novo (preto) e usado (azul).

Tabela 29 - Resultados do ensaio de DSC, temperatura de transição vítrea (T_g), temperatura de fusão (T_f) e entalpia de fusão cristalina para as amostras do polímero de isoladores novo e usado.

Amostra	T_g , °C	T_f , °C	ΔH_f , J/g
Novo	- 71,5	- 43,7	9,22
Usado	- 60,9	-44,4	9,76

Verifica-se pela Figura 40, que as curvas de DSC das amostras ensaiadas são bastante semelhantes, inclusive em termos de valores, ao reportado na literatura (COSER, 2009). Analisando ainda a Figura 40, atribui-se o desvio da linha de base a $-71,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ do polímero do isolador novo e a $-60,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ do polímero do isolador usado à transição vítrea do elastômero de silicone. Acima desta temperatura, são iniciados os movimentos de segmentos da cadeia polimérica e há uma nítida mudança de comportamento mecânico, do rígido para o flexível, característico de borrachas.

Outro evento térmico importante é a fusão ocorrida por volta de $-44\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esta fusão não significa que o material a partir dessa temperatura se comportará como um fluido viscoso, mas sim que a cristalização induzida pelo resfriamento foi destruída, pois o polímero foi resfriado até $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$, a partir de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura bastante acima da T_g (item 4.3.4.6) (COSER, 2009).

As maiores T_g e entalpia de fusão para a amostra usada corroboram os resultados de TGA e densidade, que sugeriram uma cristalização maior da amostra usada, provavelmente relacionada à degradação sofrida pelo material do isolador durante o uso. Com mais cadeias menores (quebradas) a cristalização durante o resfriamento foi superior para a amostra usada, o que propiciou um maior ancoramento da fase amorfa (em menor número), resultando numa temperatura maior necessária para os seus movimentos. Com cristalização maior, a energia gasta na destruição dos cristais também é maior.

5.4.2.10 Conclusões preliminares sobre a reciclabilidade dos materiais poliméricos descartados

Os resultados da caracterização dos materiais poliméricos indicam que o silicone dos isoladores provavelmente sofreu parcialmente algum tipo de processo degradativo, talvez uma das razões de sua troca. O fato de ser uma versão elastomérica impede a reciclagem mecânica, sendo possíveis a química e a energética.

A reciclagem energética pode ser considerada como a última alternativa, por destruir completamente o material. Mesmo que seja considerada, a quantidade de calor a ser obtida com a queima desse polímero é relativamente baixa, pois cerca de 60% do material é inorgânico (ver Tabela 26). Uma alternativa seria o co-processamento em fornos de cimento, onde a parte volátil contribuiria com a parte do calor exigido para a fabricação do cimento e o silício remanescente ficaria na composição do mesmo.

Já a reciclagem química de silicone ainda carece de desenvolvimento, tendo sido encontrado na literatura um estudo no qual obteve-se 80% de conversão após a reação do polidimetilsiloxano com tolueno (OKU, HUANG & IKEDA, 2002). Outro agravante é que o silicone é apenas uma parte do isolador, composto ainda de ferragens e de compósito. Ou seja, o isolador deve ser desmontado anteriormente ao encaminhamento somente do silicone a uma linha de reciclagem química.

5.4.3 Ensaios com materiais metálicos

5.4.3.1 Microscopia eletrônica de varredura acoplada à espectroscopia de energia dispersiva

A Figura 41 apresenta as imagens obtidas por MEV das amostras nova e usada da abraçadeira, sendo que na usada foram analisadas a superfície que ficou exposta às intempéries (externa) e a superfície que ficou em contato com o poste (interna).

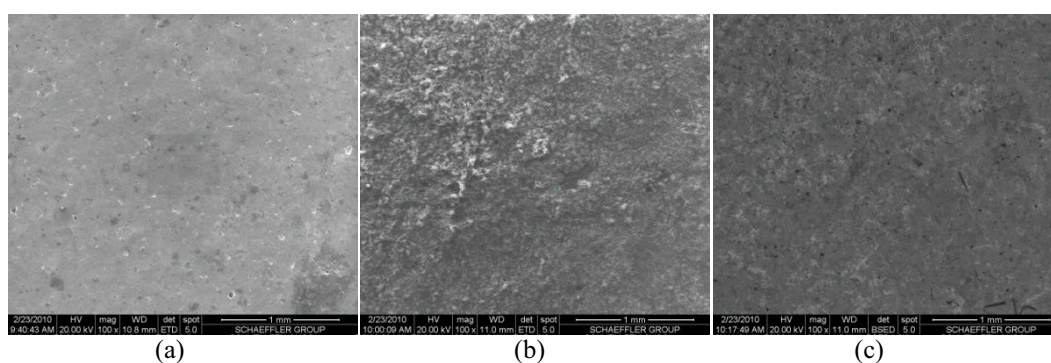


Figura 41 – Imagens obtidas por MEV da superfície de amostras de abraçadeira (obtidas originalmente com aumento de 3.000 vezes): (a) nova, (b) usada, superfície em contato com o poste e (c) usada, superfície exposta às intempéries.

A composição química das amostras obtidas através da análise de raios-X está apresentada na Tabela 30. Serão feitas para os metais as mesmas considerações que para as cerâmicas e os polímeros: a deposição de elementos provenientes da deposição ambiental é possível, porém pouco provável devido à limpeza realizada nas amostras anteriormente ao ensaio, que os removeria.

Tabela 30 – Composição química em porcentagem relativa em peso das amostras da abraçadeira.

Elementos	Nova	Usada	
		Em contato com o poste	Exposta às intempéries
Zinco	90,15%	26,11%	65,38%
Carbono	4,49%	-	6,97%
Oxigênio	3,92%	45,07%	22,76%
Chumbo	1,00%	-	-
Alumínio	0,45%	12,54%	1,29%
Silício	-	9,60%	2,01%
Ferro	-	4,57%	0,49%
Enxofre	-	0,90%	1,09%
Fósforo	-	0,40%	-
Titânio	-	0,29%	-

Verifica-se pela Figura 41 que a amostra nova mostrou uma textura mais homogênea, diferente das usadas. Uma primeira análise da Tabela 30 apontaria para a identificação da amostra como tendo como elemento metálico principal o zinco. Porém, a microscopia eletrônica de varredura trata-se de uma análise eminentemente superficial e o fato de ter sido detectado o elemento ferro nas amostras usadas indica que o material é um metal ferroso galvanizado (recoberto com zinco) e que esse recobrimento se perdeu, ao menos em parte, durante o uso. Essa perda do revestimento e exposição do ferro ao ambiente, sujeito à corrosão, é provavelmente o motivo da retirada da abraçadeira do poste, pois com o tempo o metal pode perder as propriedades mecânicas necessárias para a função. Em que pese o fato de que a EDS via MEV é uma análise semi-quantitativa, chama a atenção que na abraçadeira

em contato com o poste há uma presença de ferro bem maior (e de zinco menor), o que sugere uma degradação maior da superfície original.

Elementos como silício, enxofre, fósforo e titânio foram detectados nas amostras usadas, ou seja, aquelas nas quais mediu-se o metal que foi recoberto e não o do recobrimento, e também foram detectados no ensaio de espectrometria de emissão ótica. Podem ser considerados como elementos de liga. Desta maneira, desconsidera-se a hipótese da detecção destes pela deposição ambiental, assim como do alumínio e do carbono, que apareceram também na amostra nova.

A presença de chumbo (1,00% p/p), metal conhecido por sua toxicidade, só foi detectada na amostra nova, o que sugere que o recobrimento pode não ter sido aplicado quimicamente, como normalmente ocorre, mas sim por imersão à quente. Nestes banhos, o chumbo é normalmente empregado, pois melhora a fluidez do zinco fundido (LIMA, 2007).

5.4.3.2 Ângulo de contato

Os resultados dos ensaios de ângulo de contato da abraçadeira estão apresentados na Tabela 31. Para as amostras de abraçadeiras foram ensaiadas somente a sua superfície externa (a que teve ou terá contato com o ambiente e não com o poste).

Tabela 31 – Resultados de ângulo de contato para as amostras de abraçadeiras.

Amostra	Ângulo de contato, °
Nova	$89,77 \pm 15,84$
Usada	$75,45 \pm 14,72$

Pode se observar pela Tabela 31 que os resultados de ângulo de contato sofreram uma grande variação, com desvios da ordem de 15° . Estas variações podem ser explicadas por uma não uniformidade da superfície galvanizada, que ocorre tanto na amostra usada como na nova, esta última devido a ondulações relativas a espessuras irregulares de recobrimento. Como essas variações foram muito grandes e a diferença nos resultados não foi maior do que o desvio apresentado, não pode se afirmar que houve diferença significativa entre as amostras nova e usada, cujos resultados foram de $89,77^\circ$ e $75,45^\circ$, respectivamente. Contudo, o resultado menor para a amostra usada demonstra que a mesma possui uma superfície mais hidrofílica, que pode ser explicada por um início de corrosão devido à perda ao menos parcial do revestimento de zinco.

5.4.3.3 Densidade relativa por líquido deslocado

Os resultados da determinação da densidade relativa por líquido deslocado das amostras nova e usada da abraçadeira estão apresentados na Tabela 32.

Tabela 32 – Resultados da determinação da densidade relativa por líquido deslocado da amostra nova e usada de abraçadeira.

Amostra	Densidade Relativa
Nova	$7,83 \pm 0,02$
Usada	$7,82 \pm 0,01$

Os resultados apresentados na Tabela 32 foram muito próximos, 7,83 e 7,82 g/cm^3 . Assim, verifica-se que não houve nenhuma alteração na amostra usada que afetasse a sua densidade. Numericamente, os resultados são bastante similares aos reportados para aços e ferros fundidos (CHIAVERINI, 1996; SHACKELFORD, 2008).

5.4.3.4 Espectrometria de emissão ótica por centelha

A Tabela 33 apresenta os resultados de composição química, obtidos pelo ensaio de espectrometria de emissão ótica por centelha, das amostras de abraçadeira. O restante para completar 100% é atribuído ao elemento ferro, porém esta aproximação gera resultados não precisos, pois o equipamento não detecta todos os elementos.

Tabela 33 – Resultados da composição química obtidos pelo ensaio de espectrometria de emissão ótica por centelha para as amostras nova e usada da abraçadeira.

Elementos	Nova	Usada	
		Em contato com o poste	Exposta às intempéries
		% em peso	
Carbono	0,110	0,030	0,020
Silício	0,160	0,020	0,020
Manganês	0,670	0,240	0,250
Fósforo	0,014	0,006	0,002
Enxofre	0,016	0,029	0,015
Cromo	0,040	-	-
Níquel	0,050	0,010	-
Molibdênio	0,010	-	-
Cobre	0,150	0,010	0,010
Alumínio	0,005	0,070	0,082
Vanádio	0,002	0,001	0,001
Chumbo	0,002	-	0,001
Boro	-	0,001	-
Total	1,229	0,417	0,401

Pelos resultados da Tabela 33, observa-se que o procedimento de lixamento/polimento realizado eliminou qualquer vestígio do recobrimento de zinco proveniente da galvanização. A análise das composições permite afirmar que é um aço carbono de baixa liga. Como já comentado, define-se aço como uma liga de ferro com no mínimo 0,008% e no máximo 2,11% de carbono, bem como outros elementos adicionados (CHIAVERINI, 1986; SHACKELFORD, 2008). Já os aços carbono são comumente definidos como ligas que possuem em sua composição apenas quantidades limitadas de carbono, silício, manganês, cobre, enxofre e fósforo, sendo presentes outros elementos em quantidades residuais (CIMM, 2010). Todos os elementos reportados na Tabela 33 provavelmente são oriundos da matéria prima e/ou do processo de fabricação do aço. A diminuição ainda maior dos teores ou retirada por completo são geralmente complexas e normalmente não acrescentam propriedades, razão pela qual são deixados na composição do aço (BIELEFELDT, 2006)

Como as amostras usadas foram retiradas da mesma abraçadeira, era esperado que a composição do metal das mesmas fossem tão similares quanto mostradas na Tabela 33. As diferenças provavelmente se referem a locais da amostra onde houve uma segregação de soluto (qualquer elemento de liga que não o ferro) diferente de outro. Já a amostra nova apresenta composição bem diferente, por se tratar de uma outra abraçadeira, eventualmente feita por fabricantes e matérias-primas diferentes. Enquanto as amostras usadas apresentam um teor total de elementos de liga de aproximadamente 0,4% a amostra nova apresentou mais que o dobro, cerca de 1,23%. Ainda assim, não se pode afirmar que uma ou outra composição é mais ou adequada para uma abraçadeira, pois ambos os materiais provavelmente cumprem os requisitos mecânicos necessários.

5.4.3.5 Análise metalográfica

A Figura 42 apresenta as imagens obtidas por microscopia ótica das amostras nova e usada da abraçadeira, sendo que na usada foram analisadas a superfície que ficou exposta às intempéries (externa) e a superfície que ficou em contato com o poste (interna).

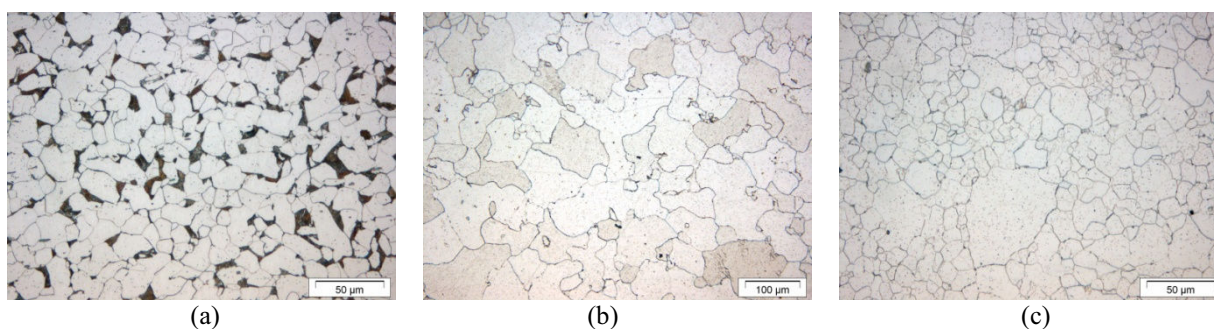


Figura 42 – Imagens obtidas por microscopia ótica de amostras de abraçadeira: (a) nova (obtida originalmente com aumento de 500 vezes); (b) usada, superfície em contato com o poste (obtida originalmente com aumento de 200 vezes) e (c) usada, superfície exposta às intempéries (obtida originalmente com aumento de 3.000 vezes).

Observam-se pela Figura 42 micrografias bastante coerentes com os resultados da Tabela 33. Isto porque nas amostras usadas, predomina a matriz bem clara, característica da ferrita, fase cristalográfica do ferro em que há a solubilidade de no máximo 0,008% de carbono. O restante se transforma em carbonetos de ferro (cementita, Fe_3C), dispostos na forma de lamelas negras na matriz ferrítica. Como a quantidade de carbono nessas amostras é muito pequena (0,02 a 0,3%), são poucas regiões pretas na estrutura. Já na amostra nova, com uma quantidade de carbono bem superior (0,11%) é nítida a presença de vários grãos praticamente pretos, formados por lamelas de cementita muito próximas umas das outras. À essa estrutura, perlítica (matriz ferrítica com lamelas de cementita), está associada a estrutura ferrítica (grãos brancos), ainda predominante (CHIAVERINI, 1986; SHACKELFORD,

2008). Os grãos das amostras novas mostraram-se mais homogêneos que os das amostras usadas, mas são parecidos em termos de tamanho.

5.4.3.6 Dureza

A Tabela 34 apresenta os resultados de dureza (na realidade microdureza, pois a carga aplicada foi menor que 1 kgf) das amostras das abraçadeiras.

Tabela 34 – Resultados de dureza das amostras de abraçadeiras.

Amostra		Dureza (HV)
Nova		147,0 ± 5,0
Usada	Face em contato com o ambiente	120,0 ± 2,5
	Face em contato com o poste	119,3 ± 0,9

Observa-se pela Tabela 34 novamente uma diferença entre as amostras nova e usada, sendo que a nova apresenta dureza superior, de 147 HV, enquanto nas usadas os valores ficam em torno de 120 HV. Estes resultados estão bastante coerentes com os resultados de espectrometria de emissão ótica por centelha (Tabela 33) e de metalografia (Figura 42), que apontaram uma concentração de carbono maior na amostra nova. O carbono é conhecido como o elemento endurecedor do ferro, ou seja, colocado muitas vezes intencionalmente à liga com o objetivo de melhorar algumas propriedades, notadamente o

módulo de rigidez e a dureza (CHIAVERINI, 1986; SHACKELFORD, 2008). Dessa maneira, não se pode atribuir as diferenças nesta propriedade mecânica ao uso do material.

5.4.3.7 Conclusões preliminares sobre a reciclabilidade dos materiais metálicos descartados

Foi observado pelos resultados apresentados que as abraçadeiras usadas perderam, ao menos parcialmente, o revestimento de zinco colocado para a proteção à corrosão. A exposição do aço a agentes corrosivos é um motivo suficiente para a retirada das abraçadeiras de uso, dado que a continuidade da corrosão pode afetar as propriedades finais, o que deve ser evitado.

Porém, parece que o envio das abraçadeiras usadas para a reciclagem parece exagerado. Isto porque, foi observado que as diferenças entre as amostras existem provavelmente somente por terem sido provenientes de fontes diferentes, o que pode envolver variados fornecedores, matéria-primas, processos etc, mas que produzam um produto que atenda as especificações técnicas. A reciclagem da abraçadeira será caracterizada pela fusão da peça, para posteriormente moldá-la novamente, por exemplo, numa nova abraçadeira, que precisará ser galvanizada.

Uma opção mais interessante, dado o uso constante dessa peça por empresas de distribuição de energia elétrica, seria o envio para a recuperação da peça. Esta recuperação poderia ser feita com a limpeza da peça para remover de vez a camada de zinco remanescente e a ferrugem (ferro corroído) da superfície e nova galvanização.

6 CONCLUSÕES

Nos resíduos de uma empresa de distribuição de eletricidade os metais ferrosos são os mais descartados, representando cerca de 39% do total (1,46 mil tonelada). Resíduos bastante atraentes ao comércio de reciclagem, como fios de cobre e de alumínio, representam conjuntamente, cerca de 33% do total, e podem alcançar o valor de até R\$ 9,94/kg. Há ainda resíduos como porcelanas, vidros e EPIs, que são comercializados por R\$ 0,01/kg.

Para os fios e cabos de alumínio nu com alma de aço, a separação dos metais presentes seria vantajosa, dada a possibilidade de venda a um preço, no mínimo, cerca de 10% superior. Para os cabos de alumínio com isolação, dependendo da composição, a sua separação pode ser vantajosa.

No caso dos “isoladores cerâmicos e de vidro com ferragens”, determinou-se que aproximadamente 49% são compostos de metais ferrosos, 44% de porcelanas e 6% de vidros. Para “chaves faca, chaves fusível e para-raios” são 35% de metais ferrosos, 4% de cobre e 5% de polímero. Para estes casos, a separação não seria vantajosa.

Para os resíduos “plásticos”, encontrou-se 28% de polietileno, 15% de PET e 10% de poliestireno. Foram encontrados ainda quase 10% de itens que não podem ser classificados como polímeros, são eles: metais, papelão e compósitos. Em pequenas quantidades (cerca de 1% cada) foram encontrados polímeros altamente valorizados, como poliamida, policarbonato e polimetacrilato de metila (acrílico). Em relação aos EPIs/EPCs, os itens mais representativos foram as vestimentas com 25% e os calçados com cerca de 15% do total.

Com relação ao estudo de avaliação da reciclabilidade, verificou-se que para as cerâmicas e metais não ocorreram alterações significativas que levassem a sugerir que houve algum tipo de deposição ambiental e/ou degradação do material. As pequenas diferenças

encontradas entre os materiais novos e usados, provavelmente devem estar relacionadas a matérias-primas, lotes, processos e/ou fornecedores diferentes. Outra possibilidade verificada durante as visitas foi a ocorrência de ranhuras ou microtrincas nos materiais cerâmicos, principalmente devido ao armazenamento pouco cuidadoso dos seus resíduos. Para as amostras usadas de abraçadeira verificou-se a perda parcial do revestimento de zinco e início de processo corrosivo.

O polímero dos isoladores foi identificado como o elastômero de silicone. Provavelmente não houve nenhum tipo de deposição de elementos com o seu uso e as diferenças encontradas entre as amostras novas e usadas podem estar relacionadas novamente a matérias-primas e/ou fornecedores diferentes, mas a característica mais hidrofílica das amostras usadas pode estar relacionada também a ocorrência de microtrincas durante o uso. Além disso, algum processo de degradação pode ter ocorrido, visto que a amostra usada apresentou uma densidade e cristalização superior à nova e também uma estabilidade térmica inicial maior verificada pelo ensaio de termogravimetria.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento desta dissertação verificou-se muitas vezes que outros estudos seriam interessantes, embora não fossem exatamente o foco deste trabalho. Fica registrado aqui que estudos seriam esses, os quais podem ser desenvolvidos futuramente.

7.1 Reutilização de Produtos

Um dos estudos mais interessantes que pode ser feito é o de reutilização de alguns produtos. Porém não se pode correr o risco de colocá-los em uso novamente sem verificar a qualidade dos mesmos com alguns testes, os quais devem ser desenvolvidos e propostos. Estes testes devem ser baseados naqueles utilizados nas inspeções das matérias primas recebidas pela empresa e devem englobar análises dimensionais e elétricas não destrutivas. Além disso, deve-se verificar nesse estudo se esses produtos que são vislumbrados para serem reutilizados realmente de uma maneira geral atendem as especificações mínimas, as quais também devem ser estudadas.

7.2 Avaliação do Ciclo de Vida de Isoladores

Outro estudo que pode ser desenvolvido é o de ACV para os isoladores, com o objetivo de estimar os impactos ambientais de determinadas escolhas, como por exemplo, isolador de vidro versus polimérico, reciclagem versus reutilização.

7.3 Estudo das Abraçadeiras

Aparentemente, as abraçadeiras descartadas necessitam somente de um novo revestimento para que possam ser reutilizadas. Isso economizaria uma série de recursos naturais empregados na reciclagem (transporte e fusão, por exemplo), fabricação de nova abraçadeira e seu revestimento. Assim, as abraçadeiras estão entre os produtos que podem ser realizados estudos mais aprofundados, tais como um estudo sobre a sua resistência mecânica após o uso.

7.4 Outros Estudos

Outros resíduos merecem estudo, tais como os postes de concreto armado, madeira, lâmpadas fluorescentes e o óleo de transformador.

8 DIVULGAÇÃO

8.1 Trabalhos Divulgados

Trabalhos completos em anais de eventos:

- 1) GIANELLI, B. F.; CRUZ, N. C.; BOTURA JR., G.; RANGEL, E. C.; **RODRIGUES, L. L.**; MANCINI, S. D.; BATISTA, V. X.; FRANCO, C. S.; ZIVIANI, J.; ANTONIOL, G.; NOGUEIRA, N. *Materiais poliméricos do setor elétrico: o caso dos isoladores*. In: 10º

Congresso Brasileiro de Polímeros. Foz do Iguaçu – PR, 2009. Anais em CD-ROM. Apresentado oralmente pela aluna, na Seção de Degradação e Reciclagem.

2) MANCINI, S. D.; **RODRIGUES, L. L.**; GIANELLI, B. F.; BATISTA, V. X.; MENDES, D. F.; FRANCO, C. S.; ZIVIANI, J.; ANTONIOL, G.; NOGUEIRA, N.; BOTURA JR., G. *Materiais descartados no setor elétrico: perspectivas de reutilização e reciclagem*. In: 8th Latin-American Congresso on Electricity Generation and Transmission. Ubatuba – SP, 2009. Anais em CD-ROM. Apresentado oralmente pela aluna.

8.2 Outros Trabalhos Divulgados

Trabalhos completos em anais de eventos:

- 1) **RODRIGUES, L. L.**; MANCINI, S. D.; BENETELLO, T.; MANTOVANI, V. A.; ETRURI, A. A.; SILVA, A. C. G.; SOUZA, B. H.; RODRIGUES, M. *Influência do tipo de coleta na reciclagem de polímeros provenientes de resíduos sólidos domésticos*. In: 10^o Congresso Brasileiro de Polímeros. Foz do Iguaçu – PR, 2009. Anais em CD-ROM. Apresentado como pôster pela aluna, na Seção de Degradação e Reciclagem.
- 2) **RODRIGUES, L. L.**; MANCINI, S. D.; FRANCO, C. S.; ZIVIANI, J.; NOGUEIRA, N.; ROSA, F. S.; PROENÇA, F. C.; ANTONIOL, G.; MANTOVANI, V. A. *Coleta seletiva de plásticos: discussões sobre a reciclabilidade, impactos ambientais e melhorias em sistemas baseados em cooperativas*. In: 1^o Congresso Nacional de Economia Solidária, Resíduos e Reciclagem. São Carlos – SP, 2009. Anais em e-book, 2009. p. 331 – 341. Apresentado oralmente pela aluna, na Seção de Economia Solidária: Tecnologias em Reciclagem de Resíduos para Geração de Trabalho e Renda.

9 REFERÊNCIAS

3E RECICLAGEM. Portal da empresa. Disponível em: <<http://www.treize.com.br/>>. Acesso em: 26 jan. 2010.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004**: 2004. Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.005**: 2004. Procedimento para Obtenção de Extrato Lixiviado de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

Achillas, C. et al. Decision support system for the optimal location of electrical and electronic waste treatment plants: A case study in Greece. **Waste Management**, 30, 870-879, 2010.

AKCELRUD, L. C. **Fundamentos da ciência dos polímeros**. Barueri: Manole, 2007.

ANJOS, M. R. O. **Avaliação de borrachas SBR utilizadas em solas de calçados de uso da Marinha do Brasil** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais)-Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

DARBELLO, S. M. **Estudo da reciclagem mecânica de poli (cloreto de vinila) – PVC – proveniente de resíduos da construção civil**. 2008. 144f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais)-Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Sorocaba, SP, 2008.

ANTONELLO, I. **Determinação de ascarel em óleo mineral isolante de transformador**. 2006. 63f. Dissertação (Mestrado em Química)-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2006.

ASHIHARA, S. et al. Recycling of insulation of 600V XLPE cable using supercritical alcohol. In: 2008 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRICAL INSULATING MATERIALS, 2008, Yokkaichi, Mie, Japão. **Proceedings of 2008 International Symposium on Electrical Insulating Materials**, p. 522-525.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM Standard D 531**: 2008a. Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement. Filadélfia: 2008.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM Standard D3418**, 2008b. Standard Test Methods for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry. West Conshohocken, PA. 2008.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM Standard E45**, 2005. Standard Test Method for Determining the Inclusion Content of Steel. West Conshohocken, PA. 2005.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM Standard E112**, 1996 (2004). Standard Test Method for Determining Average Grain Size. West Conshohocken, PA. 2004.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM Standard E1131**. 2008c. Standard Test Methods for Compositional Analysis by Thermogravimetry. West Conshohocken, PA. 2008.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM Standard D 792**: 2003. Standard Test Method for Determination of the Composition of Unprocessed Municipal Solid Waste. Filadélfia: ASTM, 2003.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM Standard D 5630**: 2006. Standard Test Method for Ash Content in Plastics. Filadélfia: ASTM, 2006.

BABU, B. R.; PARANDE, A. K.; BASHA, C. A. Electrical and electronic waste: a global environmental problem. **Waste Management & Research**, 25, p. 307-318, 2007.

BARBA-GUTIÉRREZ, Y.; ADENSO-DÍAZ, B.; HOPP, M., An analysis of some environmental consequences of European electrical and electronic waste regulation. **Resources, Conservation and Recycling**, 52, p. 481-495, 2008.

Bielefeldt, W. V.; Moraes, C. A. M.; Vilela, A. C. F.; Klujszo, L. A. C.; Fernandes, P. C. **Caracterização e estudo termodinâmico de inclusões do aço SAE 8620 produzido via Aciaria Elétrica**. Estudos tecnológicos - Vol. 2, nº 2:78-90, 2006.

CALAES, G. D. et al. Bases para o desenvolvimento sustentável e competitivo da indústria de agregados nas regiões metropolitanas do país - parte 1. **Revista Escola de Minas**, 60, n. 4, p. 675-685, 2007.

CALLISTER, JR., W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CANEVAROLO JR., S. V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. São Paulo: Ed. Artliber, 2002.

CEMPRE – COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. Portal da associação – CempreInforma – Número 107 – Setembro/Outubro 2009. Disponível em: <http://www.cempre.org.br/cempre_informa.php?lnk=ci_2009-0910_mercado.php>. Acesso em: 02 fev. 2010.

CHIAVERINI, V. **Aços-carbono e Aços-liga**. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1965.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica: estrutura e propriedade das ligas metálicas**. Rio de Janeiro: Ed. McGraw Hill, 1986.

CIMM – CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA. Dicionário Metal Mecânico. Portal da Entidade. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/verbetes/listar_letra_mm>. Acesso em: 15 jul. 2010.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução no. 307, de 5 de julho de 2002.** Brasília, DF, 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em: 21 ago. 2009.

COSER, E. **Caracterização da borracha de silicone utilizada em isoladores para a rede elétrica.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2009.

DARBELLO, S. M. **Estudo da reciclagem mecânica de poli (cloreto de vinila) – PVC – proveniente de resíduos da construção civil.** 2008. 144f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais)-Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Sorocaba, SP, 2008.

DE MARCO, I. et al. Pyrolysis of electrical and electronic wastes. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, 82, p. 179-183, 2008.

DIMITRAKAKIS, E. et al. Determining recyclables and hazardous substances in plastics. **Journal of Hazardous Materials**, 161, p. 913-919, 2009.

EHRIG, R. J. **Plastics recycling.** Nova Iorque: Hanser Publishers, 1992.

GARCIA, M. H. F.; FARIAS, S. B.; FERREIRA, B. G.. Determinação quantitativa da concentração de silicone em antiespumantes por espectroscopia FT-IR/ATR e calibração multivariada. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, 14 (5), p. 322-325, 2004.

GIANELLI, B. F. **Caracterização do efeito corona em isoladores poliméricos do tipo bastão submetidos à poluição salínica.** 2008. 73f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais)-Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, SP, 2008.

ISOLADORES SANTANA. O panorama do setor de isoladores elétricos. In: 49º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 2005, São Pedro, SP. **Anais.** São Paulo-SP: Associação Brasileira de Cerâmica, 2005. Disponível em: <<http://www.abceram.org.br/asp/49cbc/index.asp>>. Acesso em: 12 jan. 2010.

KINGERY, W. D.; BOWEN, H. K.; UHLMANN, D. R. **Introduction to Ceramics.** Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1976.

LA MANTIA, F. P. (Ed.) **Handbook of plastics recycling.** Shawbury: Rapra Technology, 2002.

Lima, G. **Influência da adição de diferentes concentrações de bismuto, níquel, estanho e alumínio sobre a espessura de camada, resistência à corrosão e brilho nos revestimentos galvanizados.** 2007. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais)-Universidade do Estado de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2007.

LIU, X.; MATSUI, M. T. Y. Electrical and electronic waste management in China: progress and the barriers to overcome. **Waste Management & Research**, 24, p. 92-101, 2006.

- MANO, E. B. **Introdução a polímeros**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1985.
- MANO, E. B. **Polímeros como Materiais de Engenharia**. Rio de Janeiro: Edgard Blucher, 1991.
- MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Identificação de Plásticos, Borrachas e Fibras**. São Paulo: Edgard Blücher, 2000.
- MANO, E. B.; PACHECO, E. B. A. V.; BONELLI, C. M. C. **Meio ambiente, poluição e reciclagem**. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.
- MANOMAIVIBOOL, P. Extended producer responsibility in a non-OECD context: The management of waste electrical and electronic equipment in India. **Resources, Conservation and Recycling**, 53, p. 136-144, 2009.
- MANRICH, S.; FRATTINI, G.; ROSALINI, A. C. **Identificação de plásticos: uma ferramenta para a reciclagem**. São Carlos: Ed. da UFSCar, 1997.
- MARK, J. E. (Ed.). **Polymer Data Handbook**. Nova York: Oxford University Press, 1999.
- MIKIYA, I.; KAZUKIYO, N. Degradation behavior and application of recycled PVC sheet made of floor sheet for railway vehicle. **Polymer Degradation and Stability**, 92, p. 1692-1699, 2007.
- MME – MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. Disponível em: <www.mme.gov.br>. Acesso em: 12 jan. 2010.
- NASCIMENTO, S. M.; DUTRA, R. I. J. P.; NUMAZAWA, S. Resíduos de indústria madeireira: caracterização, consequências sobre o meio ambiente e opções de uso. **Holos Environment**, 6, n. 1, p. 8-21, 2006.
- NORTON, F. H. **Introdução à Tecnologia Cerâmica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1973.
- OLIVEIRA, A. D.; CLAIN, A. F. Estudo comparativo da espectrometria de emissão atômica com fonte de plasma indutivamente acoplado com a espectrometria de emissão atômica com fonte de centelha para análise quantitativa de aço. **TECCEN**, 3 (1), 2010.
- OKU, A.; HUANG, W.; IKEDA, Y. Monomer recycling for vulcanized silicone rubbers in the form of cyclosiloxane monomers: role of acid buffers. **Polymer**, 43, n. 26, p. 7289-7293, 2002.
- PADILHA, A. F., AMBROZIO FILHO, F., **Técnicas de Análise Microestrutural**, São Paulo: Hemus, 1985.
- PORTELLA, K. F. et al. Reciclagem secundária de rejeitos de porcelanas elétricas em estruturas de concreto: determinação do desempenho sob envelhecimento acelerado. **Cerâmica**, 52, p. 155-167, 2006.

PRETTE, A. L. G. **Desenvolvimento de esmaltes cerâmicos: aplicação em isoladores elétricos de alto desempenho**. 2007. 77f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais)-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2007.

RADER, C. P. et al (Ed.). **Plastics, Rubber and Paper Recycling: A Pragmatic Approach**. American Chemical Society, Washington, 1995.

RADONJIC, G.; GUBELJAK, N. The use of ethylene/propylene copolymers as compatibilizers for recycled polyolefin blends. **Macromolecular Materials and Engineering**, 287 (2), p. 122-132, 2002.

RANGEL, E. C.; GADIOLI, G. Z.; CRUZ, N. C. Investigations on the stability of plasma modified silicone surfaces. **Plasmas and Polymers**, 9 (1), 35-48, 2004.

RAPOSO, C.; ROESER, H. M. Contaminação ambiental provocada pelo descarte de lâmpadas de mercúrio. **Revista Escola de Minas**, 53 (1), p. 61-67, 2000.

REICH, L.; STIVALA, S. S. **Elements of Polymer Degradation**. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1971.

RODRIGUEZ, F. **Principles of Polymer Systems**. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1970.

SEKULA, R.; LESZCZYNSKI, S. Utilization of scrap thermosets using pyrolysis. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, 31, n. 1, p. 76-85, 2009.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos Materiais**. São Paulo: Prentice Hall, 2008.

SUTANTO, P. et al. Modeling on the kinetics of an EPDM devulcanization in an internal batch mixer using an amine as the devulcanizing agent. **Chemical Engineering Science**, 61, n.19, p. 6442-6453, 2006.

U. S. Pharmacopeia – USP32-NF27 S2. **Chapter 5: General Notices – Monograph Components**. Rockville, Maryland, EUA, 2009. Disponível em: <<http://www.uspnf.com/uspnf/pub/index?usp=32&nf=27&s=2&officialOn=December%201,%202009>>. Acesso em: 12 jan. 2010.

VALT, R. B. G. **Ciclo de vida de embalagens para bebidas no Brasil**. Brasília: Thesaurus, 2007, p. 25 e 27.

VASILE, C. et al. Feedstock recycling from plastics and thermosets fractions of used computers. II. Pyrolysis oil upgrading. **Fuel**, 86, n. 4, p. 477-485, 2007.

VEENSTRA, A. et al. An analysis of E-waste flows in China. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 47, p. 449-459, 2010.

WALTHER, G. et al. Implementation of the WEEE-directive – economic effects and improvement potentials for reuse and recycling in Germany. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 47, p. 461-474, 2010.

WILLIAMS, P. T.; CUNLIFFE, A.; JONES, N. Recovery of value-added products from the pyrolytic recycling of glass-fiber-reinforced composite plastic waste. **Journal of the Energy Institute**, 78, n. 2, p. 51-61, 2005.

WIEBECK, H.; PIVA, A. M. **Reciclagem do Plástico**. São Paulo: Art Líber, 2005.

WÜNSCH FILHO, V.; NEVES, H.; MONCAU, J. E. Amianto no Brasil: conflitos científicos e econômicos. **Revista da Associação Médica Brasileira**, 47, n. 3, p. 259-261, 2001.

ZANIN, M.; MANCINI, S. D. **Resíduos plásticos e reciclagem: aspectos gerais e tecnologia**. São Carlos: Ed. da UFSCar, 2004.

ZOETEMAN, B. C. J.; KRIKKE, H. R.; VENSELAAR, J. Handling WEEE waste flows: on the effectiveness of producer responsibility in a globalizing world. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 47, p. 415-436, 2010.