

UFRRJ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

DISSERTAÇÃO

**Obtenção de blendas poliméricas a partir da reciclagem de sucatas de
aparelhos celulares e polietileno de baixa densidade reciclado**

Cássia Thais Silva Santos

2016



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

**OBTENÇÃO DE BLENDA POLIMÉRICAS A PARTIR DA
RECICLAGEM DE SUCATAS DE APARELHOS CELULARES E
POLIETILENO DE BAIXA DENSIDADE RECICLADO**

CÁSSIA THAIS SILVA SANTOS

Sob a orientação da Professora

Dr^a. Dilma Alves Costa

E Co-orientação do Professor

Dr. Rui de Goés Casqueira

Dissertação submetida como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química,
área de concentração em Química.

Seropédica, RJ

Julho de 2016

668.9

S237o Santos, Cássia Thais Silva, 1989-

T Obtenção de blendas poliméricas a partir da reciclagem de sucatas de aparelhos celulares e polietileno de baixa densidade reciclado / Cássia Thais Silva Santos. - 2016.

115 f.: il.

Orientador: Dilma Alves Costa.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2016.

Bibliografia: f. 80-87.

1. Polímeros - Teses. 2. Polietileno - Teses. 3. Lixo eletrônico - Reaproveitamento - Teses. 4. Telefone celular - Teses. 5. Engenharia química - Teses. I. Costa, Dilma Alves, 1955- II. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Título.

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

CÁSSIA THAIS SILVA SANTOS

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

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: ____/____/____

Prof^a Dr^a Dilma Alves Costa - Departamento de Engenharia Química/Instituto de Tecnologia/UFRRJ (Orientadora)

Prof Dr. Rui de Góes Casqueira - Departamento de Engenharia Química/Instituto de Tecnologia/UFRRJ (Co-orientador).

Prof^a Dr^a. Daniele Cruz Bastos - Departamento de Polímeros/UEZO

Prof^a Dr^a. Danieli Martins do Carmo - Departamento de Engenharia Química/Instituto de Tecnologia/UFRRJ.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por me fortalecer a cada dia para a conclusão desta etapa na minha vida.

Meus sinceros agradecimentos aos meus pais que contribuíram de forma extraordinária para a minha formação e foram parte fundamental nesta etapa da minha vida.

Ao meu esposo, pelo apoio, cuidado e compreensão.

Aos meus familiares e amigos que me incentivaram em todos os momentos difíceis.

A minha orientadora, Prof^a Dilma Alves Costa que com toda dedicação me auxiliou nesta caminhada e me forneceu orientações seguras para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço pela paciência e auxílio.

Ao meu co-orientador, Prof^o Rui de Góes por toda credibilidade. Aos meus professores e colegas pela caminhada de aprendizado, em especial aos colegas de turma Bárbara e Matheus, por toda ajuda nos momentos necessários.

Agradeço ao Laboratório de Polímeros do Instituto Nacional de Tecnologia (INT) por realizar os testes de Resistência a Tração, Resistência ao impacto e Dureza. Agradeço também, ao LAPIN-IMA-UFRJ pela realização das análises de FTIR e TGA. Agradeço a Prof^a Luciana Portal por todo incentivo e pelo auxílio e pela disponibilidade da Microscopia. Agradeço ao Laboratório de Catálise, ao Laboratório de Sistemas Particulados, ao Laboratório de Engenharia Química e ao Instituto de Agronomia dessa universidade por sempre disponibilizar seus equipamentos que foram essenciais para o desenvolvimento desse trabalho. Agradeço também à pesquisadora Ivonete Gonzalez por todo apoio e auxílio na confecção dos corpos de prova no CENPES e pelas palavras de estímulo na jornada.

Muito obrigada a todos que de uma forma ou de outra contribuíram não apenas para a minha dissertação, mas também para a minha jornada de vida.

RESUMO

SANTOS, Cássia Thais Silva. **Obtenção de blendas poliméricas a partir da reciclagem de sucatas de aparelhos celulares e polietileno de baixa densidade reciclado.** 2016. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2016.

É crescente a pesquisa por novos materiais e metodologias para a criação e inserção dos mesmos no mercado. Atualmente, dentre os diversos tipos de resíduos, os resíduos eletroeletrônicos tem aumentado exponencialmente, pois estes tem sido considerados obsoletos em um intervalo de tempo muito curto e necessitam de descarte adequado. No Brasil, nos últimos anos, o reaproveitamento de materiais plásticos também tem aumentado. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo pesquisar a importância da reciclagem de resíduos de telefones celulares (carcaças), que possuem curto tempo de vida útil, utilizados como reforços, no desenvolvimento de novos materiais, contendo polímero termoplástico reciclado (polietileno de baixa densidade – *PEBD*) e, a partir das análises mecânicas e da periculosidade destes novos materiais, justificar a importância da substituição de alguns materiais por outros com maior tempo de vida útil e de fácil reciclabilidade, de forma que proporcione a redução dos impactos ambientais provocados com os resíduos gerados. Para tal, foram desenvolvidas 6 blendas de (Polietileno de baixa densidade reciclado e carcaças de PC-ABS - *PEBDrec/PC-ABS*), com variação da composição e granulometria das carcaças de aparelhos celular, e também a análise dos matérias puros. Os resultados obtidos pelas análises de difração de raios-X, densidade, absorção de água, dureza, microscopia eletrônica de varredura e ensaios mecânicos mostraram que a baixa interação entre os polímeros, além da atuação do polímero amorfo na morfologia e, conseqüentemente, na cristalinidade da mistura, afetou diretamente nas propriedades térmicas e mecânicas. Quanto à análise de periculosidade dos materiais desenvolvidos, não foram encontrados níveis excedentes de metais tóxicos, conforme limites estabelecidos pela NBR ABNT 10004.

Palavras-chave: Polietileno de baixa densidade reciclado, blendas, carcaças de PC-ABS.

ABSTRACT

It is crescent the research by new materials and methods for creating and same market insertion. Currently, among the various types of waste, electronic waste is considered obsolete in a very short time and require proper disposal. In Brazil, the last year, the reuse of plastic materials has increased. This study aimed to research the importance of mobile phones waste recycling, which have short pace of useful life used as reinforcements, no development of new materials containing recycled thermoplastic polymer (Low Density Polyethylene LDPE) and from the analyzes mechanical and dangerousness of these new materials, so justify the replacement of the importance of some materials with longer life time and easy recyclability, that form provides a reduction of environmental impacts caused by the generated waste were developed six blends of (Low Density Polyethylene recycled and PCABS carcasses - LDPErec/PC-ABS), with composition and grain size variation of cell granulometry housing and also an analysis of pure materials. The results obtained for analysis of diffraction X-ray, density, water absorption, hardness, scanning electronic microscopy and mechanical testing showed one low interaction between polymers, beyond the performance of the amorphous polymer morphology and hence the crystallinity mix, directly affected at the thermal and mechanical properties. As for the hazard analysis of the materials developed, they were not found excess levels of metal toxicants, the limits established by ABNT NBR 10004

Key words: recycled low density polyethylene, blends, PC- ABS housings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estimativa da geração de REEEs no Brasil (Adaptado de ABDI, 2013).....	23
Figura 2. Carcaças de telefones celulares.....	28
Figura 3. Placa de Circuito Impresso (SANTOS, 2014).....	29
Figura 4. Estrutura química do ABS (CANEVAROLO, 2006).....	30
Figura 5. Obtenção do Policarbonato.....	31
Figura 6. Representação esquemática da polimerização por adição do Polietileno (FELDMAN, BARBALATA, 1996; TORRES, 2007).....	32
Figura 7. Representação esquemática da estrutura do PEBD (COUTINHO, MELLO, MARIA, 2003).....	33
Figura 8. Reciclagem de resíduo plástico por tipo de resina (Fonte: ABIPLAST, 2012).....	35
Figura 9. Obtenção das blendas de PEBDrec/PC-ABS.....	42
Figura 10. Carcaças de telefones celulares.....	43
Figura 11. Triturador Trapp – Forrageiro TRF 70.....	43
Figura 12. Carcaças poliméricas de aparelho celular cominuídas.....	43
Figura 13. Moinho de facas.....	44
Figura 14. Carcaças de telefones celulares submetidas ao moinho de facas.....	44
Figura 15. Separador granulométrico.....	45
Figura 16. Obtenção das blendas de PEBDrec/PC-ABS no misturador de torque Thermo Scientific.....	45
Figura 17. Foto da prensa hidráulica com aquecimento SOLAB e material obtido após o processo de moldagem por compressão.....	46
Figura 18. Durômetro Shore D.....	48
Figura 19. Preparo das amostras para realização da análise de MEV.....	49
Figura 20. Fresadora Roland EGX-350.....	50
Figura 21. Corpos de provas confeccionados para ensaio de resistência à tração.....	50
Figura 22. Máquina de ensaio impacto Izod.....	51

Figura 23. Corpos de provas confeccionados para ensaio de resistência ao impacto Izod.....	51
Figura 24. Curvas de torque das misturas de PEBDrec/PC-ABS (85/15%) nas composições de 42 mesh, 60 mesh e 115 mesh.....	53
Figura 25. Curvas de torque das misturas de PEBDrec/PC-ABS (70/30%) nas composições de 42 mesh, 60 mesh e 115 mesh.....	54
Figura 26. Espectros na região do infravermelho (FTIR) do PEBDrec (a) e das carcaças de PC-ABS (b).....	55
Figura 27. Espectros na região do infravermelho das blendas de PEBDrec/PC-ABS na composição 85/15%, nas diferentes granulometrias.....	56
Figura 28. Espectros na região do infravermelho das blendas de PEBDrec/PC-ABS na composição 70/30%, nas diferentes granulometrias.....	56
Figura 29. Difrátogramas dos polímeros: (a) - PEBDrec e (b) - carcaças de aparelho celular (PC-ABS).....	57
Figura 30. Difrátogramas das blendas de PEBDrec/PC-ABS (85/15%), nas diferentes granulometrias do PC-ABS.....	58
Figura 31. Difrátogramas das blendas de PEBDrec/PC-ABS na composição 70/30%, nas diferentes granulometrias do PC-ABS.....	59
Figura 32. Grau de cristalinidade dos polímeros PEBDrec, PC-ABS e das blendas de PEBDrec/PC-ABS nas composições de 85/15% e 70/30%, nas diferentes granulometrias do PC-ABS.....	60
Figura 33. Curva termogravimétrica do PEBD reciclado, das carcaças de PC-ABS puros.....	61
Figura 34. Curva termogravimétrica das blendas de PEBDrec/PC-ABS na composição 85/15%, respectivamente.....	62
Figura 35. Curva termogravimétrica das blendas de PEBDrec/PC-ABS na composição 70/30%, respectivamente.....	62
Figura 36. Valores de densidade obtidos das blendas de PEBDrec/PC-ABS nas proporções de 85/15% e 70/30% em diferentes granulometrias.....	64
Figura 37. Valores de dureza Shore D obtidos das blendas de PEBDrec/PC-ABS nas proporções de 85/15% e 70/30%, nas diferentes granulometrias.....	65
Figura 38. Dados de absorção de água obtidos das blendas de PEBDrec/PC-ABS nas proporções de 85/15% e 70/30% em diferentes granulometrias.....	66
Figura 39. Micrografias do PEBDrec (a) e do PC-ABS (b) (Aumento de 2000X).....	67
Figura 40. Micrografias de MEV da blenda de PEBDrec/PC-ABS (85/15%), na granulometria de 42 mesh.....	68

Figura 41. Micrografias de MEV da blenda de PEBDrec/PC-ABS (85/15%), na granulometria de 60 mesh.....	68
Figura 42. Micrografias de MEV da blenda de PEBDrec/PC-ABS (85/15%), na granulometria de 115 mesh.....	69
Figura 43. Micrografias de MEV da blenda de PEBDrec/PC-ABS (70/30%), na granulometria de 42 mesh.....	69
Figura 44. Micrografias de MEV da blenda de PEBDrec/PC-ABS (70/30%), na granulometria de 60 mesh.....	70
Figura 45. Micrografias de MEV da blenda de PEBDrec/PC-ABS (70/30%), na granulometria de 115 mesh.....	70
Figura 46. Tensão na ruptura do PEBDrec e das misturas de PEBDrec/PC-ABS, nas duas composições e diferentes granulometrias das carcaças de celulares.....	73
Figura 47. Alongamento na ruptura do PEBDrec e das misturas de PEBDrec/PC-ABS, nas duas composições e diferentes granulometrias das carcaças de celulares.....	73
Figura 48. Módulo elástico do PEBDrec e das misturas de PEBDrec/PC-ABS, nas duas composições e diferentes granulometrias das carcaças de celulares.....	74
Figura 49. Ensaio de resistência ao impacto do PEBDrec e das blendas de PEBDrec/PC-ABS, nas composições de 85/15% e 70/30%, nas diferentes granulometrias das carcaças de celulares.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição dos REEES (Adaptado de WIDMER et al., 2005).....	24
Tabela 2. Composição metálica de diferentes tipos de REEES (Adaptado de CUI; ZHANG, 2008),.....	25
Tabela 3. Composição típica de resíduos de PCI (LEE, RHEE, SOHN, 2004).....	29
Tabela 4. Propriedades físicas do PEBD (Adaptado de DOAK, 1986; COUTINHO, MELLO, MARIA, 2003).....	34
Tabela 5. Composição em massa das blendas de PEBDrec/PC-ABS, em diferentes granulometrias da carcaças de telefone celular.....	46
Tabela 6. Temperaturas inicial e máxima do PEBDrec e das carcaças de PC-ABS.....	61
Tabela 7. Valores da temperatura inicial de degradação (T_{onset}) e da temperatura em que a velocidade de degradação das blendas de PEBDrec/PC-ABS é máxima (T_{max}).....	63
Tabela 8. Densidade das blendas nas composições de 85/15% e 70/30% nas granulometrias de 42, 60 e 115 mesh.....	64
Tabela 9. Valores de dureza obtidos para as blendas nas composições de 85/15% e 70/30% nas granulometrias de 42, 60 e 115 mesh.....	65
Tabela 10. Valores da absorção de água pela amostra de PEBDrec e as blendas de PEBDrec/PC-ABS nas composições de 85/15% e 70/30%, nas diferentes granulometrias.....	66
Tabela 11. Detecção dos elementos presentes nas amostras de PEBDrec, carcaças de PC-ABS e nas blendas de PEBDrec/PC-ABS, nas composições de 85/15% e 70/30%, nas diferentes granulometrias, pela técnica de EDS.....	71
Tabela 12. Detecção dos elementos presentes nas amostras de PEBDrec, carcaças de PC-ABS e nas blendas de PEBDrec/PC-ABS, nas composições de 85/15% e 70/30%, nas diferentes granulometrias, pela técnica de EDS.....	71
Tabela 13. Resultados do ensaio de tração do PEBDrec e das blendas de PEBDrec/PC-ABS, nas duas composições e diferentes granulometrias das carcaças de celulares.....	72
Tabela 14. Resultados do ensaio de resistência ao impacto do PEBDrec e das blendas de PEBDrec/PC-ABS, nas composições de 85/15% e 70/30%, nas diferentes granulometrias das carcaças de celulares.....	74
Tabela 15. Percentuais de materiais não-metálicos no PEBDrec, PC-ABS e nas blendas de PEBDrec/PC-ABS.....	76
Tabela 16. Concentração dos metais presentes nos materiais PEBDrec, PC-ABS e blendas de PEBDrec/PC-ABS.....	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABDI** - Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
- ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ABRELPE** – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
- ABS** – Copolímero de acrilonitrila-butadieno-estireno
- ANATEL** – Agência Nacional de Telecomunicações
- ANVISA** - Agência Nacional de Vigilância Sanitária
- ATR** - Refletância Total Atenuada
- ATR-FTIR** - Espectroscopia na Região do Infravermelho Atenuado com Transformada de Fourier
- BFR** – Retardadores de chama bromados
- CE** - Resina Epóxi
- CENPES** - Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello
- CFC** – Compostos Clorofluorcarbonetos
- CONAMA** - Conselho Nacional do Meio Ambiente
- CP-REEEs** - Componentes poliméricos de telefones móveis
- DEQ** - Departamento de Engenharia Química
- DMA** - Análise Mecânico-Dinâmica
- DRX** - Difração de raios-X
- DSC** - Calorimetria Diferencial de Varredura
- EDS** - Espectroscopia de Energia Dispersiva
- EEE** - Equipamentos Elétricos Eletrônicos
- FTIR** – Espectroscopia na região do Infravermelho com Transformada de Fourier
- GPC** - Cromatografia de Permeação em Gel
- HIPS** - Poliestireno de Alto Impacto
- ICP-OES** - Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry
- IMA** - Instituto de Macromoléculas Professora Eloísa Mano

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

INT - Instituto Nacional de Tecnologia

IPMI - International Precious Metal Institute.

LABTEC - Laboratório de Tecnologia

LCA - Análise do Ciclo de Vida

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

MMA - Ministério do Meio Ambiente

NIR - Infravermelho próximo

PA - Poliamida

PC – Policarbonato

pc-ABS - ABS pós-consumo

PCB - Bifenilas policloradas

PCI – Placas de Circuito Impresso

PE - Polietileno

PEAD - Polietileno de Alta Densidade

PEBD - Polietileno de Baixa Densidade

PEBDrec – Polietileno de Baixa Densidade Reciclado

PELBD - Polietileno Linear de Baixa Densidade

PET - Politereftalato de Etileno

PEUBD - Polietileno de Ultra-Baixa Densidade

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

PP - Polipropileno

PPO - poli (óxido de p-fenileno)

PS – Poliestireno

PU – Poliuretano

rABS - Copolímero de Estireno-Acrilonitrila-Butadieno reciclado

REEE - Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos

REEEPol – Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos Poliméricos

SAN – Copolímero Estireno-Acrilonitrila

SBR – Copolímero Estireno-Butadieno

SBS – Copolímero Estireno-Butadieno-Estireno

SISNAMA - Sistema Nacional do Meio Ambiente

TGA – Análise Termogravimétrica

UEZO - Universidade Estadual da Zona Oeste

UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro

UFRRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro

LISTA DE SÍMBOLOS

Au - Ouro

Al – Alumínio

Ba – Bário

C – Carbono

°C - grau Celsius

Ca - Cálcio

Cd – Cádmió

Cl - Cloro

cm³ - centímetros cúbicos

COCl₂ – Cloreto de cobalto

Cr₂O₃ – Óxido de cromo

DP – desvio padrão

Fe – Ferro

Fe₂O₃ – Óxido de ferro

g – grama

HCl – Ácido clorídrico

Hg – Mercúrio

J - Joule

K - Potássio

L - litro

m – metro

mg – miligrama

Mg - Magnésio

min – minutos

mL - mililitro

mm – milímetros

MPa - megaPascal

μm - micrômetro

n° - número

Na – Sódio

NaOH – Hidróxido de sódio

Ni - Níquel

O – Oxigênio

P - Fósforo

Pb – Chumbo

pH - potencial hidrogeniônico

ppm – partes por milhão

rpm - rotações por minuto

S – Enxofre

Sb₂O₃ - Trióxido de antimônio

Se - Selênio

Si – Silício

Sn – Estanho

Tg – temperatura de transição vítrea

Ti - Titânio

TiO₂ – Dióxido de Titânio

Zn - Zinco

ZnO – Óxido de Zinco

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	19
2.MOTIVAÇÃO DA PESQUISA.....	20
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.2 Resíduos	22
3.1.1 Resíduos Poliméricos	21
3.1.2 Caracterização de resíduos	22
3.1.3 Resíduos eletroeletrônicos (REEE`s).....	22
3.1.3.1 Legislação ambiental para REEE`s	25
3.1.3.2 Reciclagem dos REEE`s	27
3.2 Telefones celulares	27
3.3 Placas de circuito (PCI)	28
3.4 Componentes poliméricos de telefones móveis (CP-REEEs)	30
3.4.1 Copolímero de Acrilonitrila-Butadieno-Estireno (ABS)	30
3.4.2 Policarbonato (PC).....	31
3.5 Polietileno	31
3.5.1 Polietileno de baixa densidade (PC)	33
3.5.2 Polietileno reciclado.....	34
3.6 Blendas poliméricas	35
3.7 Estudos da reciclagem das carcaças poliméricas de telefones celulares	36
4. OBJETIVOS.....	39
4.1 Objetivos específicos	39
5. MATERIAIS E MÉTODOS	40
5.1 Materiais.....	40
5.2 Equipamentos utilizados	40

5.3 Metodologia	41
5.3.1 Preparo das carcaças de PC-ABS (REEEs)	42
5.3.1.1 Cominuição e Moagem	43
5.3.1.2 Separação granulométrica	44
5.3.2 Preparo das blendas de polietileno de baixa densidade reciclado e REEEs (PEBDrec/PC-ABS)	45
5.3.3 Moldagem por compressão das blendas	46
5.3.4 Caracterização dos materiais	46
5.3.4.1 Espectrometria na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)	47
5.3.4.2 Difração de raios-X (DRX)	47
5.3.4.3 Análise Termogravimétrica(TGA)	47
5.3.4.4 Densidade	47
5.3.4.5 Dureza Shore D	48
5.3.4.6 Absorção de água	48
5.3.4.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	48
5.3.4.8 Propriedades Mecânicas	49
5.3.4.8.1 Resistência à Tração	49
5.3.4.8.2 Resistência ao Impacto	50
5.3.5 Caracterização das carcaças quanto à composição	51
5.3.5.1 Ensaio de lixiviação para determinação da periculosidade	51
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
6.1 Preparo das blendas de polietileno de baixa densidade reciclado e REEEs (PEBDrec/PC-ABS)	53
6.2 Caracterização dos materiais precursores das blendas (PEBDrec e carcaças de aparelhos celulares)	54
6.2.1 Espectrometria na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)	54
6.2.2 Difração de raios-X (DRX)	57

6.2.3	Análise Termogravimétrica (TGA).....	61
6.2.4	Densidade	63
6.2.5	Dureza Shore D	64
6.2.6	Absorção de água	66
6.2.7	Microscopia Eletrônica de Varredura	67
6.2.8	Propriedades Mecânicas	71
6.2.8.1	Resistência à Tração.....	72
6.2.8.2	Resistência ao Impacto.....	74
6.2.9	Caracterização das carcaças quanto à composição	75
6.2.9.1	Ensaio de lixiviação para determinação da periculosidade.....	75
7.	CONCLUSÕES	78
8.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	79
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
ANEXO 1	– Análise de EDS.....	88
ANEXO 2	– Análise de TGA.....	105
ANEXO 3	– Relatórios de Ensaio de Resistência a Tração	109

1. INTRODUÇÃO

A acelerada obsolescência dos equipamentos eletroeletrônicos tem-se destacado como um problema cada vez mais significativo. Tanto em países desenvolvidos quanto nos em desenvolvimento, o descarte destes materiais representa o tipo de resíduo sólido que mais cresce no mundo. O tempo médio para troca de um aparelho celular é estimado em menos de dois anos, o que significa dizer que dos celulares fabricados anualmente, entre 10 e 20% entram em inatividade a cada ano, alcançando cerca de 3 mil toneladas de celulares obsoletos a caminho dos lixões e aterros sanitários (KASPER et al., 2010; GERBASE & OLIVEIRA, 2012). Também no Brasil a preocupação com a destinação adequada dos resíduos é crescente, pois segundo dados da Abrelpe (2013), apenas 58,3% dos resíduos sólidos urbanos coletados têm destinação final adequada.

A reciclagem de lixo e a coleta seletiva, as quais englobam a reciclagem dos materiais pós-consumo (materiais descartados e com possibilidade de serem reutilizados), possuem um papel muito importante para a preservação/recuperação do meio ambiente, pois minimizam os impactos agressivos ao meio ambiente (ABRELPE, 2013).

Como exemplo deste tipo de resíduos, encontram-se os telefones celulares. Os telefones celulares contêm um número de diferentes metais (ouro, prata, platina, paládio, cobre, estanho e zinco), os quais já apresentam grande interesse na sua recuperação a partir do processo de reciclagem. Os plásticos recuperados a partir de telefones celulares são reciclados em peças de plástico para novos dispositivos eletrônicos ou outros produtos plásticos (EPA, 2011; MACHADO, 2014). Contudo o processo de reciclagem destes resíduos ainda é incipiente, pois há a necessidade de passar pelas etapas de desmontagem com eliminação das substâncias perigosas; segregação de metais ferrosos, não ferrosos e plásticos; reciclagem e/ou recuperação dos materiais de valor e tratamento/disposição de materiais e resíduos perigosos (PINHEIRO, 2009).

O resíduo polimérico presente nos REEEs ainda apresenta boas propriedades. Muitos materiais poliméricos são utilizados em equipamentos eletrônicos, mas os dois componentes mais importantes destes produtos são PC (policarbonato) e ABS (copolímero de estireno-butadieno-acrilonitrilo). A mistura do PC com outros termoplásticos tem sido uma das práticas mais populares, onde o ABS tem sido frequentemente escolhido como modificador. O custo relativamente baixo da mistura destes dois polímeros torna essa blenda especialmente interessante, com o mais caro plástico de engenharia de alta performance (PC) (TARANTILI et al., 2010).

A reciclagem dos resíduos poliméricos, especificamente do PC-ABS, por meio de técnicas de mistura por fusão é uma solução viável (BALART et al., 2005; TARANTILI et al., 2010).

Considerando o grande interesse acadêmico e industrial pelo sistema gerado pela mistura PC-ABS, por ser capaz de relacionar propriedades microscópicas com as propriedades macroscópicas (principalmente propriedades mecânicas), e o custo do material obtido, nesta pesquisa foram desenvolvidas blendas dos materiais reciclados comerciais de polietileno de baixa densidade, por ser um polímero versátil e passível de reciclagem de diferentes carcaças de aparelhos celulares. Essas blendas foram avaliadas quanto às suas propriedades térmicas, mecânicas e quanto à sua morfologia.

2. MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

O acelerado descarte dos equipamentos eletroeletrônicos tem causado preocupação com a destinação adequada desses resíduos. A reciclagem de resíduos sólidos possui um papel muito importante para a preservação do meio ambiente e é o primeiro passo para a eficácia da reciclagem dos materiais pós-consumo (materiais descartados e com possibilidade de serem reutilizados), já que o lixo doméstico vem mudando de características e tem aumentado em volume e complexidade. A reciclagem de diferentes resíduos sólidos, por meio de técnicas de mistura por fusão é uma solução viável para a maioria dos resíduos de plástico de engenharia, como no caso do ABS e policarbonato (PC) que compõem equipamentos elétricos e eletrônicos (REEEs). Esses plásticos recuperados a partir de telefones celulares podem ser utilizados na produção de peças de plástico para novos dispositivos eletrônicos ou outros produtos plásticos. Deste modo, esta pesquisa teve como justificativa:

- Dar continuidade a pesquisa desenvolvida no PPGEQ/UFRJ, utilizando o resíduo polimérico gerado na pesquisa de De Jesus (2015);
- Desenvolver novos materiais à partir da mistura dos polímeros reciclados: carcaças de aparelhos celulares (PC-ABS) e polietileno de baixa densidade reciclado (PEBDrec), com chances de serem reinseridos no mercado, e que proporcionem a redução dos impactos ambientais provocados com os resíduos gerados pelos equipamentos elétricos eletrônicos (REEEs).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Resíduos

Atualmente, é crescente a preocupação com os resíduos e vêm sendo tema de intensas discussões diante da sociedade. Com base no conceito de responsabilidade compartilhada, a sociedade passou a ser responsável pela gestão ambientalmente adequada dos resíduos sólidos. Desta forma, toda a sociedade deve estar preocupada desde o processo de produção até a destinação final dos bens de consumo (MMA, 2015).

Resíduo é todo material não aproveitado nas atividades humanas, proveniente das indústrias, comércios e residências.

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente, a Lei nº 12.305/10, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) prevê a prevenção e a redução na geração de resíduos, tendo como proposta a prática de hábitos de consumo sustentável e um conjunto de instrumentos para propiciar o aumento da reciclagem e da reutilização dos resíduos sólidos (aquilo que tem valor econômico e pode ser reciclado ou reaproveitado) e a destinação ambientalmente adequada dos rejeitos, ou seja, o que não pode ser reciclado ou reutilizado (MMA, 2014).

3.1.1 Resíduos Poliméricos

Os resíduos poliméricos quando descartados levam muito tempo para se decompor, e como, geralmente, são descartados com outros tipos de resíduos, acarreta na dificuldade de separação. Aproximadamente 64% dos resíduos plásticos são pós-consumo e os 36% restante provêm de resíduos industriais. A coleta seletiva e a triagem são as questões principais na reciclagem de resíduos plásticos, já que os resíduos encontram-se misturados. Em 2011, 6,5 milhões de toneladas de resinas termoplásticas foram consumidas. A estimativa no ano de 2012 foi de cerca de 3.262.578 toneladas de plástico pós-consumo descartados e o índice de reciclagem deste resíduo foi de apenas 20,9% (PLASTIVIDA, 2013).

A reciclagem de materiais pode ocorrer de quatro formas distintas, conhecidas como: reciclagem primária, secundária, terciária e quaternária. A reciclagem mecânica ou física pode ser dividida em reciclagem primária e secundária. De uma forma geral, pode-se dizer que o fator de distinção entre elas é a fonte de material na qual o polímero foi coletado. Logo, na reciclagem primária emprega-se polímero pós-industrial e na reciclagem secundária, polímero pós-consumo. A reciclagem terciária, também é chamada de reciclagem química e a quaternária é denominada de reciclagem energética (SPINACÉ; DE PAOLI, 2005).

A reciclagem mecânica consiste na conversão de resíduos pós-consumo ou pós-industriais em outros produtos por meio do reprocessamento destes resíduos. Na reciclagem primária os resíduos poliméricos industriais como aparas e rebarbas são reprocessados para a obtenção de novos produtos que apresentem alta semelhança com o produto virgem, tanto nas suas características como nas propriedades. Já na reciclagem secundária são feitos materiais que não necessitam atingir as características do produto original. Esse produto é confeccionado a partir dos resíduos poliméricos encontrados no resíduo sólido urbano (BROGNOLI, 2006; SPINACÉ; DE PAOLI, 2005).

A reciclagem terciária ou química pode gerar tanto substâncias combustíveis como o retorno do resíduo na forma de monômero. Consiste no reprocessamento de resíduos plásticos transformando-os em insumos químicos ou combustíveis que servem como matéria-prima em refinarias ou centrais petroquímicas. Seu objetivo é a recuperação dos componentes químicos

individuais para reutilizá-los como produtos químicos ou para a produção de novos plásticos (SPINACÉ; DE PAOLI, 2005).

Na reciclagem energética ou quaternária ocorre a compactação dos resíduos e a queima do material para a geração de energia. É o processo de recuperação da energia contida nos plásticos através de processos térmicos como incineração controlada. Este processo, porém, gera grandes quantidades de gases tóxicos para o meio ambiente, diminuindo a qualidade do ar nos locais onde estão instalados. No Brasil, o maior mercado é o da reciclagem primária, que consiste na regeneração de um único tipo de resina separadamente (MANRICH et al., 1997; SPINACÉ; DE PAOLI, 2005; MATTAR, VIANA, 2012).

3.1.2 Caracterização de resíduos

A identificação dos constituintes na caracterização do resíduo deve ser criteriosa e estabelecida de acordo com seus constituintes e o processo de origem. A caracterização de resíduos consiste em determinar os principais aspectos físico-químicos, biológicos e periculosidades dos mesmos. Os resíduos sólidos podem ser classificados de acordo com a origem, tipo de resíduo, composição química e periculosidade (ABNT NBR 10004, 2004).

No Brasil, a periculosidade de um resíduo é classificada de acordo com a norma ABNT NBR 10004 em relação às suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, podendo oferecer riscos à saúde pública ou ao meio ambiente.

Os resíduos são classificados, de acordo com a norma ABNT NBR 10004 em:

- a) Resíduos classe I – Perigosos
- b) Resíduos classe II – Não - perigosos
 - Resíduos classe II A – Não - inertes
 - Resíduos classe II B – Inertes

Os resíduos da classe I – perigosos, são aqueles que apresentam periculosidade, conforme definições norma ABNT NBR 10004. São resíduos que apresentam características como: corrosividade, reatividade, inflamabilidade, toxicidade, e patogenicidade. Os resíduos classe II – não perigosos englobam os resíduos classe IIA – não inertes, que são aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduo classe I – perigosos. Estes resíduos não se degradam ou não se decompõem quando dispostos no solo e podem ter propriedades, tais como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água, ou os resíduos de classe IIB – inertes, que não se enquadram nas classificações de resíduos de classe I e nenhum dos seus constituintes são solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade de águas (ABNT NBR 10004, 2004).

3.1.3 Resíduos Eletroeletrônicos (REEE's)

Com o avanço da tecnologia, alguns equipamentos passam a ser considerados obsoletos em intervalos de tempo muito curto, mesmo que esteja em bom estado. Neste contexto, estão inseridos os Equipamentos Elétricos Eletrônicos (EEEs).

Os Equipamentos Elétricos Eletrônicos são produtos cujo funcionamento depende do uso de corrente elétrica ou de campos eletromagnéticos. Podem ser divididos em quatro classes: linha branca, composta por refrigeradores e congeladores, fogões, lavadoras de roupa e louça, secadoras, condicionadores de ar; linha marrom, onde estão inseridos os monitores e televisores de tubo, plasma, LCD e LED, aparelhos de DVD e VHS, equipamentos de áudio, filmadoras; linha azul com as batedeiras, liquidificadores, ferros elétricos, furadeiras, secadores de cabelo, espremedores de frutas, aspiradores de pó, cafeteiras e por fim a linha verde, onde se encontram os computadores desktop e laptops, acessórios de informática,

tablets e telefones celulares. Com o término da sua vida útil passam a ser considerados Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEEs) (ABDI, 2013; ZENI et al., 2012).

De acordo com a Diretiva 2002/96/CE do Parlamento Europeu, definem-se REEEs como:

Art. 3º a) “Equipamentos elétricos e eletrônicos”, ou “EEE”: os equipamentos cujo adequado funcionamento depende de correntes elétricas ou campos eletromagnéticos, bem como os equipamentos para geração, transferência e medição dessas correntes e campos, pertencentes às categorias definidas no anexo I A e concebidos para utilização com uma tensão nominal não superior a 1000 V para corrente alternada e 1500 V para corrente contínua;

A definição de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos é portanto:

Art. 3º b) “Resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos” ou “REEE”: os equipamentos elétricos ou eletrônicos que constituem resíduos, nos termos da alínea a) do artigo 1.º da Diretiva 75/442/CEE, incluindo todos os componentes, subconjuntos e materiais consumíveis que fazem parte do produto no momento em que este é descartado; (PARLAMENTO EUROPEU, 2003).

O lixo eletroeletrônico (*e-waste, electronic waste*) é formado por eletrodomésticos, computadores, rádios, televisores, celulares e outros bens que estejam deteriorados, obsoletos ou quebrados. Esse lixo é composto, principalmente, de plástico, ferro, metais não ferrosos, vidro e madeira. Os equipamentos eletrônicos contêm várias frações de materiais valiosos sendo que a maioria destas substâncias está nas placas de circuito impresso. Esses resíduos são tidos como de alto custo, tóxico e de alto valor tecnológico (DE OLIVEIRA, GERBASE, 2012; ZENI et al., 2012).

De acordo com o estudo da Inventta+drive, em 2012, o Brasil gerou 976 mil toneladas de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos. Segundo o estudo intitulado Logística Reversa de Equipamentos Eletroeletrônicos – Análise de Viabilidade Técnica, o Brasil pode ter gerado aproximadamente 1,100 mil toneladas de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos em 2014 e o estimado para 2015 foi de 1,247 mil toneladas, onde 150 dos maiores municípios brasileiros, a maioria nas regiões Sudeste e Sul, foram responsáveis por aproximadamente dois terços de todo o lixo eletroeletrônico descartado no país (ABDI, 2013).

A Figura 1 ilustra os índices da estimativa de geração de REEE no Brasil (ABDI, 2013).

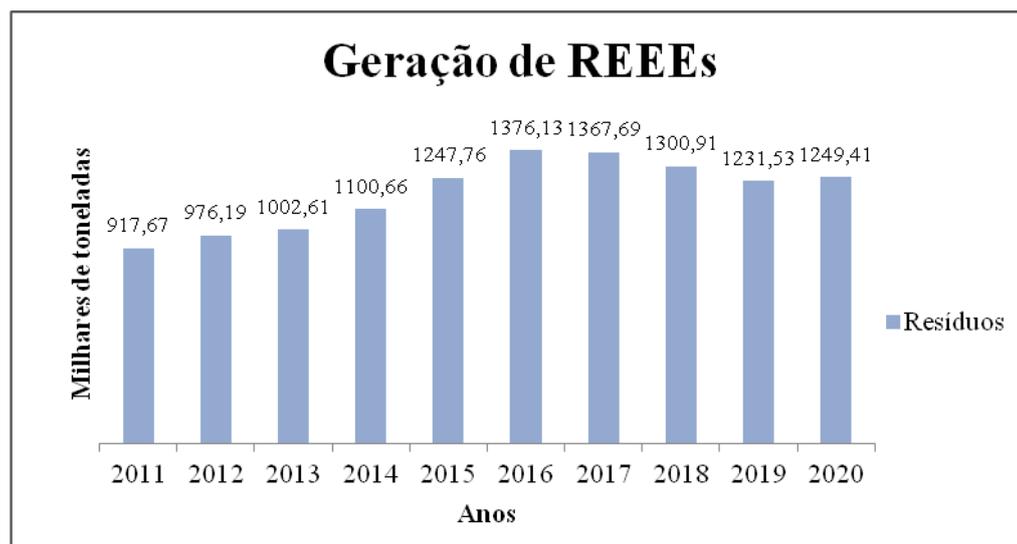


Figura 1. Estimativa da geração de REEEs no Brasil (Adaptado de ABDI, 2013)

O lixo eletrônico é considerado um dos maiores problemas ambientais e sociais, já que a quantidade gerada deste material só está aumentando e seu descarte não vem sendo realizado de maneira apropriada. Sua composição é muito diversa e composta por metais

pesados que podem causar grandes impactos ao meio ambiente. Estes metais pesados são encontrados naturalmente no ambiente e são permitidos em quantidades mínimas para a manutenção da vida, contudo em grandes concentrações podem causar efeitos insalubres (DA SILVA, MARTINS, DE OLIVEIRA, 2007).

De acordo com Widmer (*apud* RODRIGUES, 2007, p.70), “os REEEs, podem conter mais de mil substâncias diferentes, muitas das quais são altamente tóxicas como chumbo, arsênio, cádmio, cromo hexavalente e os retardantes de chama bromados e halogenados, que geram dioxinas e furanos quando incinerados.”

A principal composição dos REEEs é de 48 % de metal ferroso, responsáveis por quase metade do peso total dos REEEs. Os plásticos são o segundo maior componente em peso, representando cerca de 21% e 13% de metais não ferrosos, tais como metais preciosos e de 5% de vidro, além dos metais pesados perigosos ou produtos químicos tóxicos, como: chumbo, cádmio, mercúrio, retardadores de chama bromados (BFR) e bifenilas policloradas (PCBs) (LEE, ROINE, 2004).

No Brasil, cerca de 60% do lixo inclui algum tipo de resíduo eletrônico. A composição dos REEEs é específica para cada aparelho. Mediante a isto, os materiais encontrados nos REEEs podem ser divididos em seis categorias (CROWE et al., 2003; FRANCO, 2008):

- ferro e aço, utilizado para embalagens e quadros; o potencial perigo do ferro e do aço para o meio ambiente é considerado baixo;
- metais não ferrosos, o cobre e suas ligas são utilizados para fios, condutores de eletricidade e calor e como pigmento nos plásticos. O risco toxicológico para a saúde humana não é significativo, sendo significativo para o lixiviado em aterro;
- vidro utilizado para telas, janelas;
- plástico usado como revestimento em cabos e para placas de circuito. A quantidade relativa de plásticos contendo compostos retardantes de chama depende do tipo de aparelho. Placas de circuito, bem como os termoplásticos, são tratadas com retardantes de chama. Os retardantes de chama são aditivos adicionados aos plásticos para aumentar a resistência à inflamabilidade; são classes de compostos que incluem halogenados orgânicos (bromados e clorados), compostos de fósforo, nitrogênio e alguns inorgânicos.
- dispositivos eletrônicos montados em placas de circuito;
- outros (borracha, madeira, cerâmica etc).

A Tabela 1 apresenta a composição média dos REEEs

Tabela 1. Composição dos REEEs (Adaptado de WIDMER et al., 2005)

Material	Composição (% peso)
Ferro e aço	47,9
Cobre	7,0
Alumínio	4,7
Outros metais (não-ferrosos)	1,0
Não retardadores de chama	15,3
Retardadores de chama	5,3
Vidro	5,4
Madeira e compensados	2,6
Cerâmica e concreto	2,0
Borracha	0,9
PCI (Placas de Circuito Impresso)	3,1
Outros	4,6

A Tabela 2 apresenta alguns exemplos da composição de metais de alguns tipos de REEEs.

Tabela 2. Composição metálica de diferentes tipos de REEEs (Adaptado de CUI; ZHANG, 2008)

Resíduo eletrônico	Fração mássica (%)				Concentração (ppm)			
	Fe	Cu	Pb	Ni	Al	Ag	Au	Pd
Placas de TV	28	10	1,0	0,3	10	280	20	10
Placas de PC	7	20	1,5	1	5	1000	250	110
Placas de telefones celulares	5	13	0,3	0,1	1	1380	350	210
Placas de DVD player	62	5	0,3	0,05	2	115	15	4
Placa mãe de PC	4,5	14,3	2,8	2,2	14	639	566	124
PCI	12	10	1,2	0,85	7	280	110	-
Resíduo eletrônico típico	8	20	2	2	2	2000	1000	50
Mistura de lixo eletrônico	36	4,1	4,9	0,29	1,0	-	-	-

Embora seja a fração de maior valor agregado dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos, as PCI (Placas de Circuito Impresso) representam um grande desafio em termos de reciclagem e descarte.

3.1.3.1 Legislação ambiental para REEEs

A diferença na destinação dos equipamentos elétricos e eletrônicos pós-consumo está diretamente relacionada ao fator cultural, ao poder econômico e às legislações específicas de cada país. Nos países onde não existem políticas públicas para este tipo de resíduo, o armazenamento e a doação são as ações mais realizadas. Já nos países onde a legislação para REEEs já está inserida, a reciclagem e o reuso são os fins mais praticados (PINHEIRO et al., 2009).

O CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) é o órgão consultivo e deliberativo do Sistema Nacional do Meio Ambiente - SISNAMA e foi instituído pela Lei 6.938/81, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, regulamentada pelo Decreto 99.274/90. A Resolução CONAMA 257/1999 - "Estabelece que pilhas e baterias que contenham em suas composições chumbo, cádmio, mercúrio e seus compostos, tenham os procedimentos de reutilização, reciclagem, tratamento ou disposição final, ambientalmente adequados." - Data da legislação: 30/06/1999 - Publicação DOU: 22/07/1999

Considerando os impactos negativos causados ao meio ambiente pelo descarte inadequado de pilhas e baterias usadas, há necessidade de se disciplinar o seu descarte e o gerenciamento ambientalmente adequado no que tange à coleta, reutilização, reciclagem, tratamento ou disposição final e ainda, que tais resíduos além de continuarem sem destinação adequada e contaminando o ambiente necessitam, por suas especificidades, de procedimentos especiais ou diferenciados, resolve que as pilhas e baterias que contenham em suas composições chumbo, cádmio, mercúrio e seus compostos, necessárias ao funcionamento de quaisquer tipos de aparelhos, veículos ou sistemas, móveis ou fixos, bem como os produtos eletroeletrônicos que as contenham integradas em sua estrutura de forma não substituível, após seu esgotamento energético, serão entregues pelos usuários aos estabelecimentos que as comercializam ou à rede de assistência técnica autorizada pelas respectivas indústrias, para repasse aos fabricantes ou importadores, para que estes adotem, diretamente ou por meio de terceiros, os procedimentos de reutilização, reciclagem, tratamento ou disposição final ambientalmente adequada (MMA, 2015).

No Brasil, em 1991 o Congresso Nacional decretou o Projeto Lei 203/91, instituindo a Política Nacional de Resíduos Sólidos que diz respeito ao gerenciamento desses resíduos, ou seja, a segregação, a coleta, a manipulação, a triagem, o acondicionamento, o transporte, o

armazenamento, o beneficiamento, a comercialização, a reciclagem, a disposição final e o tratamento. Conforme o Artigo 7º, a Política Nacional de Resíduos Sólidos tem por objetivos:

- I - proteção da saúde pública e da qualidade ambiental;
- II - não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos;
- III - estímulo à adoção de padrões sustentáveis de produção e consumo de bens e serviços;
- IV - adoção, desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas como forma de minimizar impactos ambientais;
- V - redução do volume e da periculosidade dos resíduos perigosos;
- VI - incentivo à indústria da reciclagem, tendo em vista fomentar o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados;
- VII - gestão integrada de resíduos sólidos;
- VIII - articulação entre as diferentes esferas do poder público, e destas com o setor empresarial, com vistas à cooperação técnica e financeira para a gestão integrada de resíduos sólidos;
- IX - capacitação técnica continuada na área de resíduos sólidos;
- X - regularidade, continuidade, funcionalidade e universalização da prestação dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos, com adoção de mecanismos gerenciais e econômicos que assegurem a recuperação dos custos dos serviços prestados, como forma de garantir sua sustentabilidade operacional e financeira, observada a Lei nº 11.445, de 2007;
- XI - prioridade, nas aquisições e contratações governamentais, para:
 - a) produtos reciclados e recicláveis;
 - b) bens, serviços e obras que considerem critérios compatíveis com padrões de consumo social e ambientalmente sustentáveis;
- XII - integração dos catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis nas ações que envolvam a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos;
- XIII - estímulo à implementação da avaliação do ciclo de vida do produto;
- XIV - incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético;
- XV - estímulo à rotulagem ambiental e ao consumo sustentável.

A subseção IX dessa política trata dos resíduos de produtos tecnológicos destinados ao uso pelo consumidor, ou seja, os provenientes da indústria de informática ou automotiva, os eletroeletrônicos, de comunicação e outros que, após o encerramento de sua vida útil, necessitem de destinação final específica sob pena de causar danos ao meio ambiente ou à saúde pública, responsabilizando os fabricantes pelo gerenciamento dos resíduos gerados por esses produtos. (CÂMARA, 2002)

A seção IV aborda o tema reciclagem, considerando que a mesma deve ser adotada quando apresentar viabilidade econômica e na existência ou possibilidade de criação de um mercado para as substâncias produzidas, se os custos forem compatíveis. Além disso, deve apresentar viabilidade técnica mesmo que seja necessário o pré-tratamento do resíduo e também ser ambientalmente conveniente. E em Parágrafo Único afirma: a reciclagem deve ocorrer de forma apropriada e segura, de acordo com a natureza do resíduo, e de forma a não ferir os interesses públicos, nem aumentar a concentração de poluentes (CÂMARA, 2002).

No ano de 2010, o plenário da Câmara dos Deputados aprovou em votação simbólica um substitutivo ao Projeto de Lei 203/91, do Senado, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e impõe obrigações aos empresários, aos governos e aos cidadãos no gerenciamento dos resíduos.

Segundo o Ministério do Meio Ambiente, esta lei antecipa a prevenção e a redução na geração de resíduos, tendo como proposta a prática de hábitos de consumo sustentável, cria metas importantes que irão contribuir para a eliminação dos lixões um conjunto de instrumentos para propiciar o aumento da reciclagem e da reutilização dos resíduos sólidos, bem como a destinação ambientalmente adequada dos rejeitos (MMA, 2015).

3.1.3.2 Reciclagem dos REEE's

De acordo com o Crowe et al., as etapas de reciclagem dos REEEs são similares para a maioria dos equipamentos e consistem em quatro etapas: desmontagem; segregação de metais ferrosos, não-ferrosos e de plásticos; reciclagem e recuperação de materiais com maior valor econômico e o tratamento e disposição de resíduos perigosos. Na etapa de desmontagem ocorre a remoção das partes contendo substâncias perigosas (CFCs, Hg, PCB e outras); há também a remoção das partes que contenham substâncias de valor, como cabos contendo cobre, aço, ferro e partes contendo metais preciosos. Na etapa de segregação de metais ferrosos, não-ferrosos e plásticos é realizado um processo de fragmentação e, posteriormente, a separação magnética que remove a fração ferrosa presente no fluxo de materiais. Nesta fase deve-se ter cuidado com o risco de emissão de componentes voláteis. Na reciclagem de materiais, os materiais ferrosos, não-ferrosos e metais preciosos são destinados a plantas específicas para recuperação. Na última etapa, a fração do material não recuperado pode ser depositada em aterros ou, em alguns casos, incinerada. Os compostos clorofluorocarbonetos (CFCs) são tratados termicamente e os compostos bifenilas policloradas (PCBs) são incinerados ou depositados em locais subterrâneos, sendo o mercúrio (Hg) reciclado.

Devido à presença de um número diverso de materiais, a recuperação dos REEEs é um desafio. Considerando apenas o teor de materiais plásticos que compõem os REEEs (teclados, mouses, monitores e CPUs, telefones celulares etc) pode-se basear em mais de 15 tipos diferentes de plásticos de engenharia, incluindo: o copolímero de acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), o poliestireno de alto impacto (HIPS), o polipropileno (PP), o poliestireno (PS), os copolímeros de estireno-acrilonitrilo (SAN), os poliésteres, o poliuretano (PU), a poliamida (PA), as blendas de policarbonato e copolímero de acrilonitrilo-butadieno-estireno (PC/ABS) e de poliestireno de alto impacto/poli (óxido de p-fenileno) (HIPS/PPO). Juntamente com esta variedade significativa de materiais poliméricos, vários aditivos (orgânicos e inorgânicos) também são adicionados aos polímeros, que muitas vezes são substâncias perigosas capazes de alterar as propriedades do material tais como a cor, o ponto de fusão, a inflamabilidade e a densidade, para os efeitos legais, de design e/ou de custo. Estes aditivos podem ser os pigmentos (por exemplo, TiO_2 , ZnO , Cr_2O_3 , Fe_2O_3 , Cd), os retardadores de chama (frequentemente compostos orgânicos bromados combinados com Sb_2O_3 ou bifenilos policlorados (PCB)), e vários estabilizantes ou plastificantes (por exemplo, compostos de Ba , Cd , Pb , Sn e Zn , ou PCBs). Cerca de 65% em massa dos polímeros presentes em equipamentos elétricos e eletrônicos relacionados a área de informática são de ABS e HIPS e na área de telefones celulares são de PC e ABS (MOREIRA, BUENO, NASCENTE, 2002; MARTINHO et al., 2012; MARTINS et al., 2015; HIRAYAMA, 2015).

3.2 Telefones celulares

No mundo, as vendas de celulares totalizaram aproximadamente 1,8 bilhão de unidades em 2013, um aumento de 3,5% em relação ao ano de 2012. Segundo dados da ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações), no Brasil, no mês de janeiro de 2015 existiram cerca de 281,70 milhões de linhas ativas na telefonia móvel (ANATEL, 2015; GATNER, 2014).

Os celulares evoluíram substancialmente ao longo das últimas décadas. Os primeiros telefones celulares no início da década de 1980 eram pesados e robustos. Na década de 1990 os avanços foram significativos e os celulares tornaram-se mais leve, levando a atuais modelos de celulares com peso inferior a 100 gramas. Contudo, o peso e o tamanho reduzido contribuíram para a desmaterialização e impacto ambiental reduzido de telefones móveis individuais (BASEL CONVENTION, 2006).

Os telefones móveis são similares em composição com outros dispositivos eletrônicos, composto de cerca de 40% de plásticos, carbono e metais ferrosos estão contidos em quantidades relativamente baixas, cerca de 3%, 15% de cerâmica e vidro, 37% de não-ferrosos e 5% de outros materiais. Além disso, os componentes menores, por exemplo, bromo, cádmio, cromo, chumbo e de polímero de cristal líquido, estão contidos em 0,1% a 1% por cada substância (BASEL CONVENTION, 2006; MOLTÓ et al., 2011; MARAGKOS et al., 2013).

Um telefone móvel é constituído por antena, tela, display de cristal líquido – LCD, bateria, circuitos eletrônicos - uma placa de circuito impresso que contém um microprocessador, uma carcaça plástica (às vezes contendo material de revestimento ou forro), uma base de carregamento ou conector - um pequeno transformador de baixa tensão em corrente, arame, plástico com pontos de ligação de cobre, utilizada para recarregar a bateria, e os acessórios, como um fone de ouvido ou cabo de conexão a um computador. O telefone móvel contém um revestimento de metal no interior, aplicado para fornecer proteção contra radiação eletromagnética (IPMI, 2003; MOLTÓ et al., 2011). A Figura 2 ilustra carcaças de telefones celulares recolhidas.



Figura 2. Carcaças de telefones celulares

3.3 Placas de Circuito Impresso (PCI)

A técnica fundamental para o desenvolvimento das Placas de Circuito Impresso (PCI) surgiu em 1903, com as pesquisas do inventor alemão Albert Hanson. Contudo, tiveram sua origem em 1936, através do engenheiro austríaco Paul Eisler. As PCI são utilizadas por toda a indústria eletrônica, sendo constituída por uma placa (ou cartão) onde são impressas ou depositadas trilhas de cobre. A sua composição é variada, contendo polímeros, cerâmicas, metais tradicionais e preciosos, o que torna sua reciclagem bastante difícil e complexa. A placa se comporta como um isolante (dielétrico), as trilhas têm a função de conectar eletricamente os diversos componentes e as funções que representam (MELO, RIOS, GUTIERREZ, 2001). Algumas placas de circuito impresso são mostradas na Figura 3.



Figura 3. Placa de Circuito Impresso (SANTOS, 2014)

A classificação das placas de circuito impresso considera os materiais que constituem as placas, que a indústria costuma designar como “laminado”. Quando a base do laminado é um aglomerado de papel e resina fenólica, utiliza-se a nomenclatura FR-2. Este tipo de PCI é empregada na indústria de aparelhos eletrônicos de consumo e eletrodomésticos de maneira geral. Outra classe de placa é a denominada FR-4, na qual o laminado é de fibra de vidro, material mais resistente do que aquele usado na FR-2, sendo assim encontrado também nas configurações de dupla face e multicamadas. Estes tipos de placas são encontradas nos setores de informática, telecomunicações, controles industriais e outros (MELO, RIOS, GUTIERREZ, 2001).

Há também outro tipo de laminado, denominado CEM-x, formado por um material composto de papel, resina e fibra de vidro, que pode ser entendido como um tipo intermediário entre a FR-2 e a FR-4 (ANDRADE, 2002).

Nas placas de circuito impresso estão contidas a maioria dos metais presentes nos aparelhos de telefones celulares. As PCI são feitas de resina epóxi, fibra de vidro e cobre. Normalmente, um retardador de fogo de bromo é adicionado à resina para aumentar a resistência ao fogo. No geral, os circuitos integrados e outros componentes eletrônicos contêm resina, silício, ouro, prata, níquel, ferro, alumínio e outros metais que, juntamente com as peças eletrônicas estão ligados à placa por uma solda contendo chumbo e estanho. A Tabela 3 apresenta a composição de resíduo de PCI (LEE, RHEE, SOHN, 2004).

Tabela 3. Composição típica de resíduos de PCI (LEE, RHEE, SOHN, 2004).

Material	% em peso
Ouro	0,035
Cobre	22,0
Estanho (solda)	1,5
Chumbo (solda)	2,6
Fibra de vidro	30,0
Resina epóxi	15,0
Outros (Fe, Ni, Si etc)	29,0

As placas de circuito impresso apresentam uma composição muito diversificada, mas no geral, são compostas por uma gama de metais e ligas metálicas, além de compostos orgânicos e inorgânicos. Seus resíduos, se dispostos incorretamente, podem acarretar riscos ambientais e à saúde. Neles estão contidos a maior parte dos metais presentes nos telefones celulares.

3.4 Componentes poliméricos de telefones móveis (CP-REEEs)

Os polímeros utilizados nos telefones celulares em sua maioria são termoplásticos. São tipicamente feitos do polímero ABS (copolímero de acrilonitrila-butadieno-estireno) ou da blenda polimérica de policarbonato/copolímero de acrilonitrila-butadieno-estireno (PC/ABS), pois essa mistura confere propriedades retardantes de chama ao material. O ABS é uma resina que apresenta resistência química, alto brilho e boa relação custo-benefício, porém tem como desvantagens a inflamabilidade e a suscetibilidade à degradação termo e foto-oxidativa. (IPMI, 2003).

3.4.1 Copolímero de Acrilonitrila-Butadieno-Estireno (ABS)

As resinas de ABS apresentam um conjunto de propriedades adquiridas pelas diferentes fases que valoriza este material comercialmente. A reciclagem do ABS vem aumentando nos últimos anos, em especial na indústria de eletrodomésticos e na indústria automobilística.

O ABS, termoplástico de origem amorfa, é um copolímero formado basicamente por duas fases, uma matriz rígida de SAN (Estireno-acrilonitrila) com uma fase elastomérica dispersa de Polibutadieno. O ABS é produzido pela copolimerização da acrilonitrila (20 a 30%) e estireno (20 a 60%), originando o SAN, onde a fase elastomérica do polibutadieno (20 a 30%) está dispersa na matriz composta pelo SAN. A Figura 4 apresenta a estrutura química do ABS (UTRACK; WEISS, 1989, CANEVAROLO, 2006).

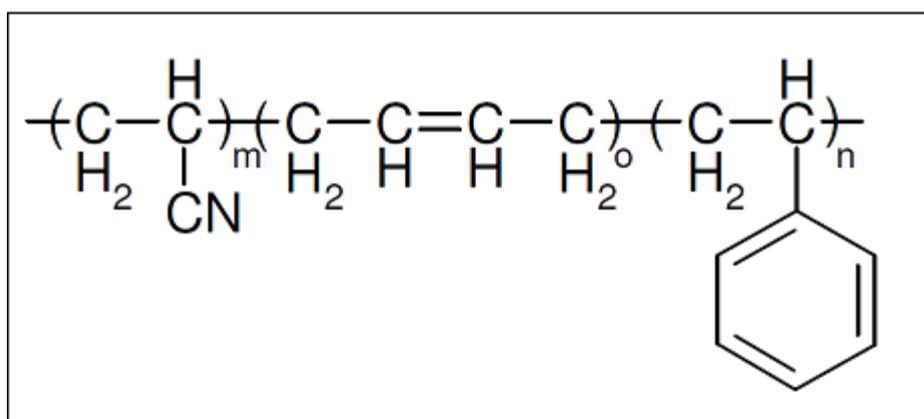


Figura 4. Estrutura química do ABS (CANEVAROLO, 2006)

A acrilonitrila agrega ao copolímero resistência térmica e química; o estireno confere o brilho, a moldabilidade e a rigidez. Já o polibutadieno atribui a resistência ao impacto, tenacidade e flexibilidade. O ABS possui estrutura amorfa, alto brilho, boa resistência química, bom acabamento superficial. Pode ser processado pelos métodos mais comuns de moldagem de polímeros, como: injeção, extrusão, termoformagem e compressão (CARVALHO, 2009; RODA, 2015).

Este polímero é utilizado em autopeças, eletrodomésticos e eletroeletrônicos. A maioria dos aparelhos celulares têm suas carcaças constituídas por uma mistura de PC/ABS (Policarbonato/copolímero de acrilonitrila-butadieno-estireno), tornando possível a sua reciclagem (KASPER, 2010).

3.4.2 Policarbonato (PC)

O Policarbonato é um termoplástico de engenharia derivado de carbono, muito conhecido por ser transparente como vidro e resistente como o aço, o qual combina um alto nível de características mecânicas, óticas, térmicas e elétricas. É obtido pela reação entre derivados do ácido carbônico e do bisfenol A. O policarbonato é utilizado na confecção de CDs e DVDs devido às suas propriedades, como excepcional transparência e transmitância, baixa absorção de umidade, rigidez, resistência térmica e altíssima resistência ao impacto (GIOVANELLA et al, 2008).

O processo de polimerização mais conhecido para a obtenção do policarbonato é a fosgenação direta e a reação de transesterificação de derivados de ésteres. Esse método é empregado industrialmente e ilustrado na Figura 5. A obtenção do PC ocorre via policondensação pela reação de fosgênio (COCl_2) e pelo p-isopropileno-difenol (bisfenol A), com liberação de moléculas de ácido clorídrico (HCl) (MANO, MENDES, 1999; USP, 2015; MUNDO EDUCAÇÃO, 2015).

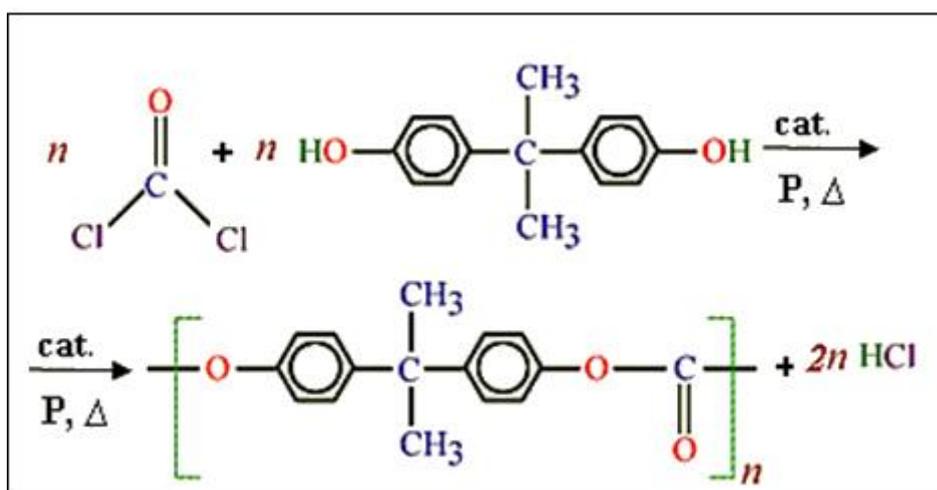


Figura 5. Obtenção do Policarbonato (MUNDO EDUCAÇÃO, 2015)

O policarbonato pode ser facilmente moldado pelas técnicas convencionais de processamento de termoplásticos sob condições normais. A maior quantidade de PC é moldada por injeção, podendo também ser processado por extrusão, termoformagem e sopro (MANO, MENDES, 1999; USP, 2015).

3.5 Polietileno

As poliolefinas estão entre os polímeros mais importantes em termos de produção mundial e apresentam ampla variedade de estruturas, propriedades e aplicações. Desta família, um dos polímeros de destaque é o Polietileno (PE).

A produção comercial do PE foi iniciada em 1939 nos laboratórios da Imperial Chemical Industries, da Inglaterra, por Eric Fawcett e Reginald Gibson em um experimento acidental onde o etileno foi submetido a uma pressão de 140 Mpa e 170°C, sendo obtido um polímero ramificado de massa molar moderada. Na década de 50, devido à utilização de catalisadores de óxidos metálicos (Processo Phillips) e a utilização de catalisadores de metais de transição (processo Ziegler-Natta) foi possível obter polietilenos de estrutura linear em condições de baixa pressão e temperatura, sendo denominados polietilenos de alta densidade (DOAK, 1986).

O PE é o terceiro plástico mais produzido no mundo por ser um termoplástico muito versátil, abundante e barato devido a sua baixa densidade, boa processabilidade e baixo custo. É um polímero sintético, parcialmente cristalino, flexível, produzido por poliadição, geralmente branco e opaco, cujas propriedades são acentuadamente influenciadas pela combinação de zonas da fase amorfa, onde as cadeias macromoleculares são desordenadas e de zonas de fase cristalina, onde as cadeias poliméricas são organizadas (FERREIRA, 2007).

Sua estrutura planar obedece a conformação zig-zag, sendo constituído pela repetição do monômero $-(CH_2)_n-$ e finalizado com grupos CH_3 . O comprimento das ligações de carbono é cerca de $1,54 \times 10^{-7} \mu m$, e o ângulo de ligação entre os mesmos é de $109,5^\circ$ (WASILKOSKI, 2002; TORRES, 2007)

A fabricação do PE convencionalmente ocorre a partir do monômero etileno (C_2H_4), que se encontra no estado gasoso. Os processos de polimerização variam com o tipo de PE, mas, de uma maneira geral, são obtidos através polimerização por adição de moléculas de etileno, conforme ilustrado na Figura 6 (FELDMAN, BARBALATA, 1996; WASILKOSKI, 2002; TORRES, 2007).

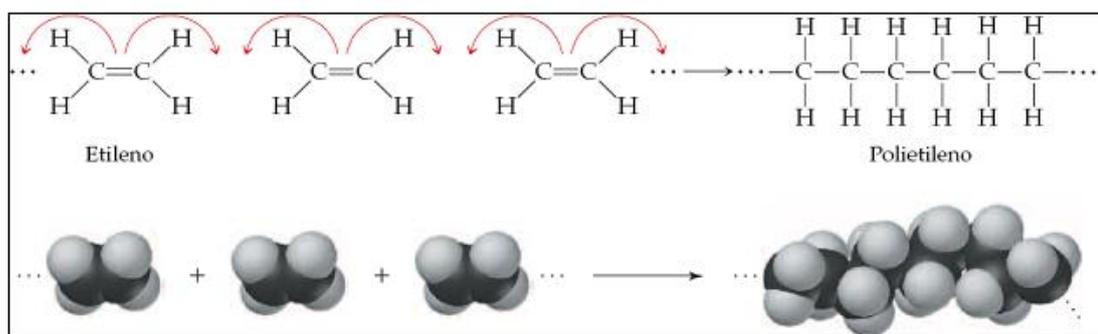


Figura 6. Representação esquemática da polimerização por adição do Polietileno (FELDMAN, BARBALATA, 1996; TORRES, 2007).

Nesta reação, a dupla ligação em cada molécula de etileno é rompida e dois dos elétrons originalmente nessa ligação são usados para formar uma nova ligação simples $C - C$ com duas outras moléculas de etileno (FELDMAN, BARBALATA, 1996; WASILKOSKI, 2002; TORRES, 2007).

De uma maneira geral, o PE apresenta uma série de propriedades altamente interessantes para diversas aplicações, tais como, excelente resistência química e elétrica, baixo coeficiente de fricção, baixa densidade, boa flexibilidade sem o uso de plastificantes, resiliência, alta resistência ao rasgamento, resistência à umidade e a produtos químicos, além de fácil processamento. O PE é inerte em relação à maioria dos produtos químicos comuns, sendo, em temperaturas abaixo de $60^\circ C$, parcialmente solúvel em todos os solventes e, em condições normais, não é tóxico. A faixa de trabalho para processamento desta resina varia de $40^\circ C$ a $93^\circ C$ (DE ISLABÃO, 2005; FERREIRA, 2007)

No passado, o polietileno era classificado pela sua densidade e pelo tipo de processo usado em sua fabricação. Atualmente, são descritos como polietilenos ramificados e polietilenos lineares. Este polímero apresenta diferenças nas suas propriedades físicas e químicas devido à polimerização, densidade, reticulação e possui uma variedade de tipos e de faixa de propriedades, tais como densidade, massa molar, distribuição de massa molar, entre outras (FELDMAN, BARBALATA, 1996; COUTINHO, MELLO, MARIA, 2003; FERREIRA, 2007).

Diversos tipos de polietileno são produzidos atualmente. Os polietilenos obtidos podem ter diferentes quantidades e tamanhos de ramificações e é isto que diferencia os

principais tipos de PE na cadeia polimérica. Dependendo das condições reacionais e do sistema catalítico empregado na polimerização, cinco tipos diferentes de PE podem ser produzidos. São eles: (a) Polietileno de baixa densidade (PEBD); (b) Polietileno de alta densidade (PEAD); (c) Polietileno linear de baixa densidade (PELBD); (d) Polietileno de ultra-baixa densidade (PEUBD); (e) Polietileno de ultra-alto peso molecular (PEUAPM). Cada um destes tipos apresenta suas características específicas como morfologia, flexibilidade, transparência, resistência ao impacto entre outras (FELDMAN, BARBALATA, 1996; COUTINHO, MELLO, MARIA, 2003; FERREIRA, 2007)

3.5.1 Polietileno de baixa densidade

O polietileno de baixa densidade (PEBD) foi descoberto por volta de década de 30. Seu processo de obtenção ocorre por polimerização em massa via radical livre em pressões de aproximadamente 1500 e 3000atm e temperaturas da ordem de 250°C. O sistema de iniciação na polimerização de etileno é o que difere um PEBD de um PEAD. Os iniciadores comumente utilizados são o oxigênio, peróxidos e hidroperóxidos. Como solventes são utilizados o benzeno e o clorobenzeno (FELDMAN, BARBALATA, 1996; LEGUENZA, 1999).

A reação de polimerização é bastante exotérmica, sendo a remoção de calor uma das maiores dificuldades neste processo. É um polímero parcialmente cristalino (50 – 60%), cuja temperatura de fusão (Tm) está na região de 110 a 115 °C (FELDMAN, BARBALATA, 1996; LEGUENZA, 1999). A Figura 7 mostra uma representação da estrutura de PEBD.

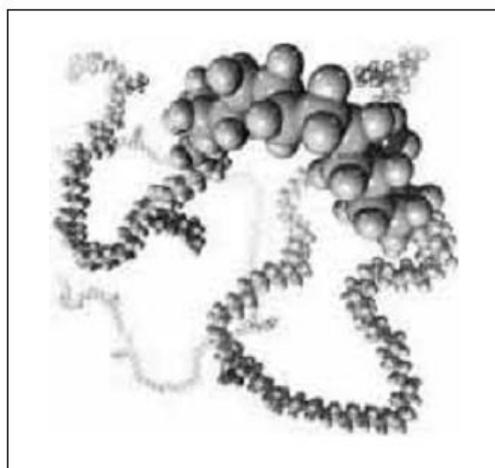


Figura 7. Representação esquemática da estrutura do PEBD (COUTINHO, MELLO, MARIA, 2003)

O PEBD é caracterizado pela sua estrutura molecular, onde estão presentes tanto ramificações longas quanto curtas. Apresenta cadeias ramificadas, na maioria das vezes, tão longas quanto à cadeia principal. Essas ramificações vão afetar a viscosidade, o grau de cristalização e as temperaturas de transição. Devido à presença de ramificações de cadeias amplas, o PEBD apresenta pequeno grau de cristalinidade, havendo cadeias laterais fora da cadeia principal do polímero. Este polímero quando comparado ao polietileno linear, apresenta cristalitos menores, menor cristalinidade e maior desordem cristalina, já que as ramificações longas não podem ser bem acomodadas na rede cristalina. A presença de ramificações longas aumenta a resistência ao impacto, diminuem a densidade e facilitam o processamento (PEREIRA, 1997; COUTINHO, MELLO, MARIA, 2003; WASILKOSKI, 2002; FERREIRA, 2007).

Suas propriedades físicas são funções de três variáveis independentes: peso molecular, distribuição de peso molecular e tamanho da ramificação. O PEBD tem propriedades singulares, como: tenacidade, alta resistência ao impacto, alta flexibilidade, boa processabilidade, estabilidade e propriedades elétricas notáveis. O PEAD e o PEBD apresentam aplicações semelhantes, contudo, os produtos do PEAD são geralmente duros e resistentes, enquanto que os de PEBD são mais flexíveis e transparentes. (COUTINHO, MELLO, MARIA, 2003; TORRES, 2007).

O PEBD é atacado lentamente por agentes oxidantes apesar de ser altamente resistente à água e a algumas soluções aquosas, inclusive a altas temperaturas. Possui baixa solubilidade em solventes polares como álcoois, ésteres e cetonas. A Tabela 4 apresenta as principais propriedades físicas do PEBD.

Tabela 4. Propriedades físicas do PEBD (Adaptado de DOAK, 1986; COUTINHO, MELLO, MARIA, 2003)

Propriedade	PEBD	Método ASTM
Densidade, g/cm ³	0,912-0,925	D 792
Temperatura de fusão cristalina, °C	101-112	-
Índice de refração, n _D	1,51-1,52	D542
Resistência à tração, Mpa	6,9-16	D 638
Alongamento máximo, %	100-800	D 638
Módulo elástico, Mpa	102-240	D 638
Dureza, Shore D	40-50	D 676

O PEBD pode ser processado por extrusão, moldagem por sopro e moldagem por injeção. Sendo assim, apresenta aplicações bem diversas, como filmes para embalagens industriais e agrícolas, filmes destinados a embalagens de alimentos líquidos e sólidos, filmes laminados e plastificados para alimentos, embalagens para produtos farmacêuticos e hospitalares, brinquedos e utilidades domésticas, tubos e mangueiras, fios e cabos para televisão e telefone, entre outros (COUTINHO, MELLO, MARIA, 2003).

3.5.2 Polietileno reciclado

O lixo brasileiro contém de 5 a 10% de plásticos, conforme o local. A fabricação de plástico reciclado economiza 70% de energia, considerando todo o processo desde a exploração da matéria-prima primária até a formação do produto final (RECICLA BRASIL, 2015).

Dentre as resinas termoplásticas, o polietileno é um dos polímeros mais utilizados. A utilização de PE reciclado é crescente na produção de embalagens e outros artefatos plásticos e sua reciclagem gera benefícios como: redução do consumo de água, de energia e da emissão de gases como dióxido de carbono. Seus processos de reciclagem mecânica mais comumente empregados são: moagem, derretimento, corte e granulação dos resíduos plásticos (RECICLA BRASIL, 2015). Segundo os dados divulgados pela Plastivida (2012) e apresentado pela Abiplast (2014) setenta e dois por cento de resinas plásticas de PEBD e PELBD são reciclados no Brasil (Figura 8) (ABIPLAST, 2012).

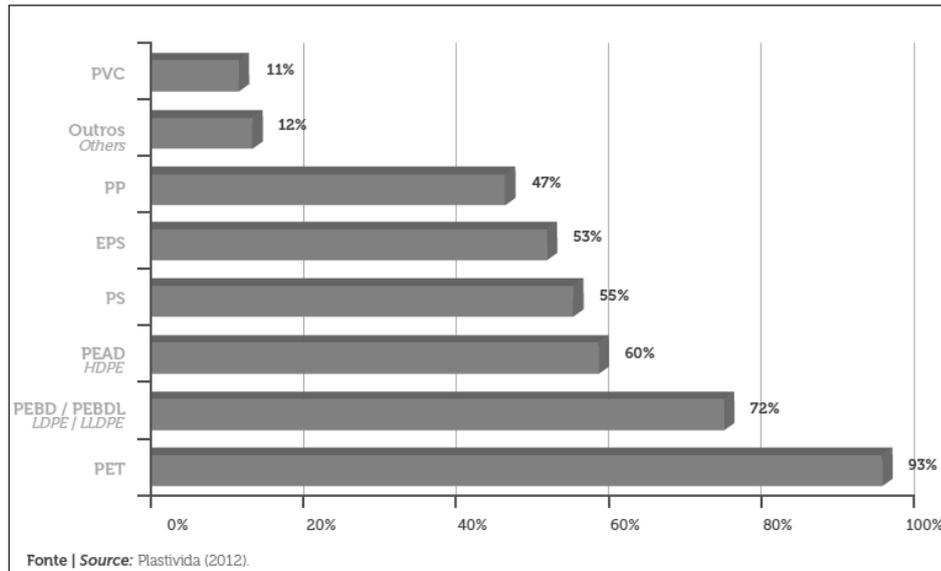


Figura 8. Reciclagem de resíduo plástico por tipo de resina (ABIPLAST, 2012)

De acordo com uma pesquisa realizada pela ABIPLAST (2014), estima-se que são retirados do meio ambiente, por ano, aproximadamente 805 mil toneladas de resíduos pós-consumo, que dão origem a mais de 725 mil toneladas de materiais plásticos reciclados. Diversos produtos podem utilizar resina reciclada em sua composição, de acordo com as normas apontadas pelos órgãos competentes (como INMETRO, ABNT, ANVISA e outras). Obedecendo a legislação, muitas empresas desenvolveram linhas de produtos com apelo ecológico e optaram por utilizar essas resinas. As empresas que fabricam utilidades domésticas para a área de serviço são as que mais utilizam resinas recicladas. Os produtos incluem cabides de roupas, prendedores, vasos, bandejas, bacias e vassouras, mas também há interesse por parte de produtores de bens para agropecuária, automotivo, têxtil e construção civil. Os produtos plásticos são 100% recicláveis e existe uma Norma Técnica (NBR 13.230) para a identificação dos produtos plásticos e suas respectivas matérias-primas a fim de facilitar o processo de reciclagem (ABIPLAST, 2015).

3.6 Blendas poliméricas

Blendas poliméricas são misturas físicas de dois ou mais tipos de polímeros, sem que haja ligação química entre eles. Este tipo de mistura pode ser um sistema homogêneo, unifásico, ou como um sistema heterogêneo, multifásico. Blendas miscíveis apresentam apenas uma fase, isto é, os polímeros misturam-se intimamente não havendo qualquer segregação entre os componentes. As propriedades dos tipos de blenda dependerão da composição do sistema, da compatibilidade de seus ingredientes, do processamento e da morfologia apresentada pelas fases. Blendas imiscíveis apresentam uma separação natural entre os componentes, formando assim um sistema heterogêneo de duas ou mais fases (JEONA, 2000; KONG, HAY, 2002; ORÉFICE, MOARES, VASCONCELOS, 2004). Sendo assim, se apresentam como uma proposta interessante para obter materiais poliméricos com as mais diferentes características a um custo relativamente baixo por meio de combinações de polímeros com as propriedades de interesse (LUNA et al., 2015).

O policarbonato tem excelentes propriedades mecânicas, sendo a resistência ao impacto um diferencial. Blendas contendo policarbonato e outros polímeros estão sendo

estudadas, objetivando modificações na transparência óptica, estabilidade térmica e propriedades mecânicas dos polímeros dispersos (ORÉFICE et al., 2004).

O interesse por misturas poliméricas tem crescido continuamente durante as últimas décadas. A combinação de polímeros é um método economicamente viável para obter materiais com boas características físicas, químicas e físico-químicas. A blenda de dois ou mais polímeros descartáveis pode resultar em um material de baixo custo e com propriedades interessantes e ainda, sem a quebra de cadeias do polímero puro. Os setores que mais estão crescendo nessa área são: o automotivo, elétrico e eletrônico, de embalagem, de construção, aeronáutica, e de utensílios doméstico (KONING et al., 1998; WIEBECK; PIVA, 2005; LUNA et al., 2015).

3.7 Estudos da reciclagem das carcaças poliméricas de telefones celulares

Todos os termoplásticos componentes de telefones celulares ou computadores podem ser reciclados. No entanto, para separá-los por tipo não é fácil nem economicamente viável, então uma alternativa é reciclá-los em conjunto, como uma mistura. Para aumentar a adesão interfacial e agregar valor a um novo material obtido à partir de REEE plástico, Vazquez e Barbosa (2016) utilizaram diferentes agentes compatibilizantes, para misturas de HIPS/ABS de REEEs, na proporção 80/20 %. O objetivo deste trabalho foi analisar comparativamente o desempenho e a eficácia dos copolímeros (estireno-acrilonitrila - SAN, estireno-butadieno-estireno - SBS e estireno-butadieno - SBR), nas concentrações 2% e 20% em peso. Considerando as misturas analisadas, o melhor desempenho foi conseguido através da utilização de 2% de borracha de estireno-acrilonitrila (SAN) (VAZQUEZ; BARBOSA, 2016).

As blendas de PC/ABS são comumente usadas em carcaças de telefones celulares e computadores. Apresentam propriedades interessantes que variam de acordo com o percentual de cada material. A morfologia da mistura é um fator determinante nas propriedades mecânicas destas blendas. PC e ABS são bastante semelhantes em polaridade e podem ser compatíveis uns com os outros. Uma mistura de PC/ABS tem propriedades semelhantes ao PC e ABS isoladamente, exceto que, geralmente é uma blenda mais forte, mais resistente e mais durável, sendo muito utilizada para melhorar a resistência ao impacto de peças de uso geral. Suas blendas são resistentes à temperaturas altas ou baixas, à umidade e à deformação permanente devido a um estresse contínuo. O ABS contribui para uma melhor processabilidade e menor custo da blenda. Já o PC fornece boas propriedades mecânicas e térmicas à blenda. A proporção da composição é muito importante para haver boa interação entre as duas fases. (AHMED, 2014; BAYER, 2014).

No trabalho de Balart et al. (2005) misturas de dois resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos - REEEs (ABS/PC) foram preparadas através de um processo de fusão. O efeito de miscibilidade parcial e os níveis de degradação prévia foram investigados. A caracterização mecânica do sistema ABS/PC foi realizada para determinar o limite de composição ótima da mistura. Os níveis de degradação prévia dos dois resíduos foram investigados por FTIR e uma pequena degradação foi encontrado no ABS, devido à presença da borracha de polibutadieno, que é mais sensível aos processos termo-oxidativo, mas nenhuma degradação significativa foi encontrada no PC. Uma certa miscibilidade entre os dois componentes foi verificada a partir da identificação de duas temperaturas de transição vítrea (Tg). Esta miscibilidade parcial, em conjunto com a pequena degradação do componente elastomérico, contribuiu para uma interação entre os componentes e consequentemente uma redução no desempenho mecânico.

As características dos plásticos de engenharia utilizados na preparação de equipamentos elétricos e eletrônicos foram estudadas por Tarantili et al. (2010). Mais especificamente, a resposta térmica foi registrada por calorimetria diferencial de varredura

(DSC), as propriedades reológicas foram investigadas por meio de testes de índice de fluidez (MFI) e as propriedades mecânicas foram avaliadas com o teste de tração. O objetivo foi estabelecer um procedimento para a reciclagem de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEEs). Os resultados experimentais mostraram que as misturas de PC/ABS ou ABS/HIPS podem ser obtidas por mistura direta, sem a necessidade de triagem. Estas misturas podem ser facilmente processadas e apresentam propriedades mecânicas aceitáveis com um custo razoável.

No trabalho de Kasper et al. (2010) buscou-se avaliar a possibilidade de reciclagem mecânica dos polímeros que compõem estas sucatas dos telefones celulares. Conforme identificação dos fabricantes, a grande maioria dos aparelhos descartados tinha a sua carcaça constituída por uma mistura de PC/ABS (policarbonato + copolímero de acrilonitrila-butadieno-estireno), tornando possível a sua reciclagem, o que pode ser comprovado através de ensaios físico-mecânicos realizados em corpos de prova obtidos do material reciclado. Ensaios de espectroscopia de infravermelho revelaram que na parte polimérica das placas de circuito impresso (PCIs) estão presentes as resinas Epóxi e Poliéster, que são termofixas e que, portanto, não são passíveis de reciclagem mecânica. Uma alternativa para reciclar mecanicamente estas resinas foi a incorporação de percentuais (5 %) destas resinas termofixas como carga no material reciclável.

A reciclagem de plásticos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE) requer tecnologias de triagem e identificação de alto desempenho em grande escala. O objetivo do projeto de Beigbender et al. (2013) foi avaliar o desempenho da caracterização de amostras de três polímeros de estireno de REEE: acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS), poliestireno de alto impacto (HIPS) e mistura de acrilonitrila-butadieno-estireno/policarbonato (ABS/PC), desenvolvidas pela empresa PELLENC ST, através do infravermelho próximo (NIR) e estudar as propriedades físico-químicas dos materiais reciclados. O uso da técnica de infravermelho próximo permitiu níveis elevados de eficiência e desempenho a ser alcançado. Este estudo pode ser usado para avaliar a relação de substituição de polímeros de estireno virgens por reciclados pela análise do ciclo de vida (LCA) dos materiais recuperados. propriedades mecânicas e propriedades de chama dos polímeros ordenados foram investigadas. As propriedades mecânicas dos polímeros, particularmente, do HIPS, foram ligeiramente modificadas após a triagem. No entanto, foi observada uma degradação da fase de polibutadieno. Testes de chama revelaram a presença de retardadores de chama no ABS e HIPS. Por isso, o processo de NIR pode ser utilizado depois de uma primeira triagem dos resíduos plásticos bromados, a fim de respeitar a directiva RoHS. Este projeto oferece alternativas industrialmente viáveis para a valorização dos resíduos plásticos e o uso de matérias-primas secundárias (BEIGBEDER et al, 2013).

No trabalho Scaffaro e colaboradores (2012), foi estudado o efeito do teor de PC/ABS e de ciclos de reprocessamento sobre as propriedades físicas das misturas preparadas e foram realizados testes mecânicos (ensaios de tração, de flexão e de impacto) e medições reológicas e termo-mecânica. O ABS pós-consumo (pc-ABS) e misturas virgens foram re-processadas e re-formadas até três vezes.

A capacidade de processamento de misturas de PC/ABS não foi substancialmente diferente do que do ABS virgem até dois passos de reciclagem. Já no terceiro induziu uma diminuição de viscosidade ligeiramente, mais notável de acordo como aumento do teor de PC/ABS. As propriedades mecânicas e termomecânicas das amostras diminuíram ao aumentar o nível de PC/ABS na mistura (SCAFFARO; BOTTA; DI BENEDETTO, 2012).

Martins et al. (2015) concluíram a partir do estudo do comportamento térmico de partículas da blenda de PC+ABS, de carcaças de aparelhos de telefones celulares, de diferentes diâmetros (0,60 - 0,85 mm e 0,86 - 1,70mm), que as partículas nos diâmetros estudados possuem apenas uma perda de massa, não sendo possível a separação dos dois

polímeros por fusão. Também detectaram uma única perda de material orgânico, comprovando mais uma vez a impossibilidade da separação dos dois resíduos. Os tamanhos diferentes das partículas não influenciaram no resultado final, pois as duas situações indicaram que existe uma diferença muito grande da temperatura de separação dos componentes da mistura. A temperatura ideal para realizar a separação do PC é entre 145°C e 265°C e a do ABS entre 105°C e 175°C, observando uma diferença de mais de 120°C. Esses pesquisadores concluíram que o ideal é encontrar outros métodos de reutilização da blenda PC+ABS, como por exemplo, a utilização como carga parcial para a produção de outros aparelhos de telefones celulares.

O efeito da adição de um extensor de cadeia à base de resina epóxi (CE) nas propriedades do copolímero de estireno-acrilonitrila-butadieno reciclado (rABS) foi investigado pelos pesquisadores Wang et al. (2015), a partir da diferença das propriedades entre rABS e ABS virgem, e pela proposição de um possível mecanismo de envelhecimento. Várias técnicas de caracterização, incluindo espectroscopia na região do infravermelho atenuado com transformada de Fourier (ATR-FTIR), cromatografia de permeação em gel (GPC), ensaio mecânico, análise mecânico-dinâmica (DMA), reologia, microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram aplicadas para estudar a modificação da estrutura química, da massa molar, as propriedades mecânicas, mecânico-dinâmicas, reológicas e a morfologia, respectivamente. Os resultados indicaram que a massa molar, resistência ao impacto e a resistência à tração, os módulos de armazenamento e de perda, e a viscosidade das amostras de rABS foram aumentadas pela adição de CE. Além disso, as parcelas de viscosidade também revelaram que a extensão de cadeia (ABS-CE) da amostra de rABS tinha uma estrutura ramificada que proporcionou um melhor processamento, utilização e propriedades para a reciclagem de rABS.

4.OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo realizar a reciclagem de materiais poliméricos contidos em aparelhos de telefones celulares de diferentes tipos e marcas (REEEs - carcaças de telefone) para utilização deste material reciclado, na obtenção de blendas poliméricas com polietileno de baixa densidade reciclado.

4.1 Objetivos Específicos

- Obter as blendas de PEBDrec/PC-ABS, em diferentes composições e granulometrias do PC-ABS;
- Caracterizar as blendas de PEBDrec/PC-ABS à partir das análises de espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), difração de raios-X (DRX);
- Avaliar as propriedades físicas de densidade e absorção de água das blendas de PEBDrec/PC-ABS;
- Avaliar a propriedade de degradação térmica das blendas de PEBDrec/PC-ABS;
- Avaliar as propriedades mecânicas de resistência à tração, deformação na ruptura, módulo de elasticidade, resistência ao impacto e dureza das blendas de PEBDrec/PC-ABS;
- Avaliar a morfologia das blendas de PEBDrec/PC-ABS à partir da análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- Avaliar e classificar a periculosidade das blendas de PEBDrec/PC-ABS, de acordo com as normas do CONAMA.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Materiais

Para a realização da etapa experimental desta dissertação, foram utilizados os materiais relacionados abaixo:

- Polietileno de baixa densidade reciclado, fornecido pela Peterlu Indústria e Comércio de Plásticos Ltda;
- Carcaças de telefones celulares trituradas e moídas, colhidas em diferentes pontos de coletas do Rio de Janeiro, constituídas em maioria de PC/ABS;
- Reagentes: ácido clorídrico; ácido nítrico; hidróxido de sódio e ácido acético glacial, utilizados para os ensaios de lixiviação e periculosidade.

5.2 Equipamentos utilizados

Foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Balança Mettler AE 50, sensibilidade de 0,0001 g - Laboratório de Tecnologia de Polímeros – Departamento de Engenharia Química -DEQ/ UFRRJ;
- Misturador de torque, marca Thermo Scientific, modelo PolyLab QC, com rotores roller e composto de software PolyLab QC - Laboratório de Tecnologia de Polímeros – DEQ/UFRRJ;
- Prensa Hidráulica com aquecimento, marca SOLAB, modelo SL-11 - Laboratório de Tecnologia de Polímeros – DEQ/UFRRJ;
- Prensa hidráulica Carver - modelo 3851 – Tecnologia Petroquímica - CENPES
- Grupo de peneiras de análise granulométrica (mesh/Tyler), marca Laboratory Test Sieve – Laboratório de Engenharia Química – DEQ/UFRRJ;
- Moinho de facas – Laboratório de Engenharia Química – DEQ/UFRRJ;
- Triturador Trapp – Forageiro TRF 70 na Peneira N.5 TRF-70/100AT; Laboratório de Monitoramento Ambiental I – Água e Efluentes I – DEQ/UFRRJ;
- Placa de aquecimento com a agitação magnética, FALC - Laboratório de Tecnologia de Polímeros – DEQ/UFRRJ;
- Difratômetro de raios-X, RIGAKU, modelo MINI FLEX II – Laboratório de Catálise – DEQ/UFRRJ;
- Microscópio eletrônico de varredura (MEV) - JEOL JSM-6490LV, voltagem de 20 KV - Laboratório de Microscopia, Universidade Estadual da Zona Oeste - UEZO;
- Microscópio eletrônico de varredura (MEV) - JEOL JSM-6460LV, voltagem de 20 KV - Laboratório de Microscopia Eletrônica, Departamento de Engenharia de Produção - UFRJ;
- Espectrômetro FTIR da marca Varian, modelo Excalibur Series; - Laboratório de Apoio Instrumental I – Instituto de Macromoléculas Professora Eloísa Mano – IMA – UFRJ;
- Analisador termogravimétrico (TGA), TA Instruments, modelo Q500 – Laboratório de Apoio Instrumental I – Instituto de Macromoléculas Professora Eloísa Mano – IMA - UFRJ;
- Fresadora Roland EGX-350 - Tecnologia Petroquímica - CENPES;
- Máquina de ensaio Universal Emic DL3000 – Laboratório de Polímeros – Instituto Nacional de Tecnologia – INT;

- Equipamento de impacto para plásticos no modo Izod com pêndulo de 2,7J de energia nominal e entalhador acoplado com faca para entalhe em “V” - Laboratório de Polímeros – Instituto Nacional de Tecnologia – INT;
- Durômetro Shore, tipo D com escala de sensibilidade até 90° Shore.- Laboratório de Polímeros – Instituto Nacional de Tecnologia – INT;
- Incubadora refrigerada (Shaker), MARCONI – Laboratório de Sistema Particulado – DEQ/UFRRJ
- Paquímetro digital Mitutoyo Digimatic Calipers, com sensibilidade de 0,05 mm - Laboratório de Polímeros – Instituto Nacional de Tecnologia – INT;

5.3 Metodologia

A metodologia detalhada do preparo das amostras de PEBDrec/REEEPol (a cominuição, a moagem e separação granulométrica das carcaças de telefones celulares) e a obtenção das blendas de PEBDrec/PC-ABS segue no esquema da Figura 9.

Os materiais precursores (PEBDrec e PC-ABS) e as blendas de PEBDrec/PC-ABS foram caracterizados e analisados quanto as suas propriedades físicas, térmicas e mecânicas, a partir das análises das curvas de torque, da análise de espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), difração de raios-X (DRX), análise termogravimétrica (TGA), da absorção de água, da dureza, da densidade, ensaios de tração, ensaio de resistência ao impacto, além da análise morfológica através da microscopia eletrônica de varredura (MEV/EDS) e ensaio de periculosidade.

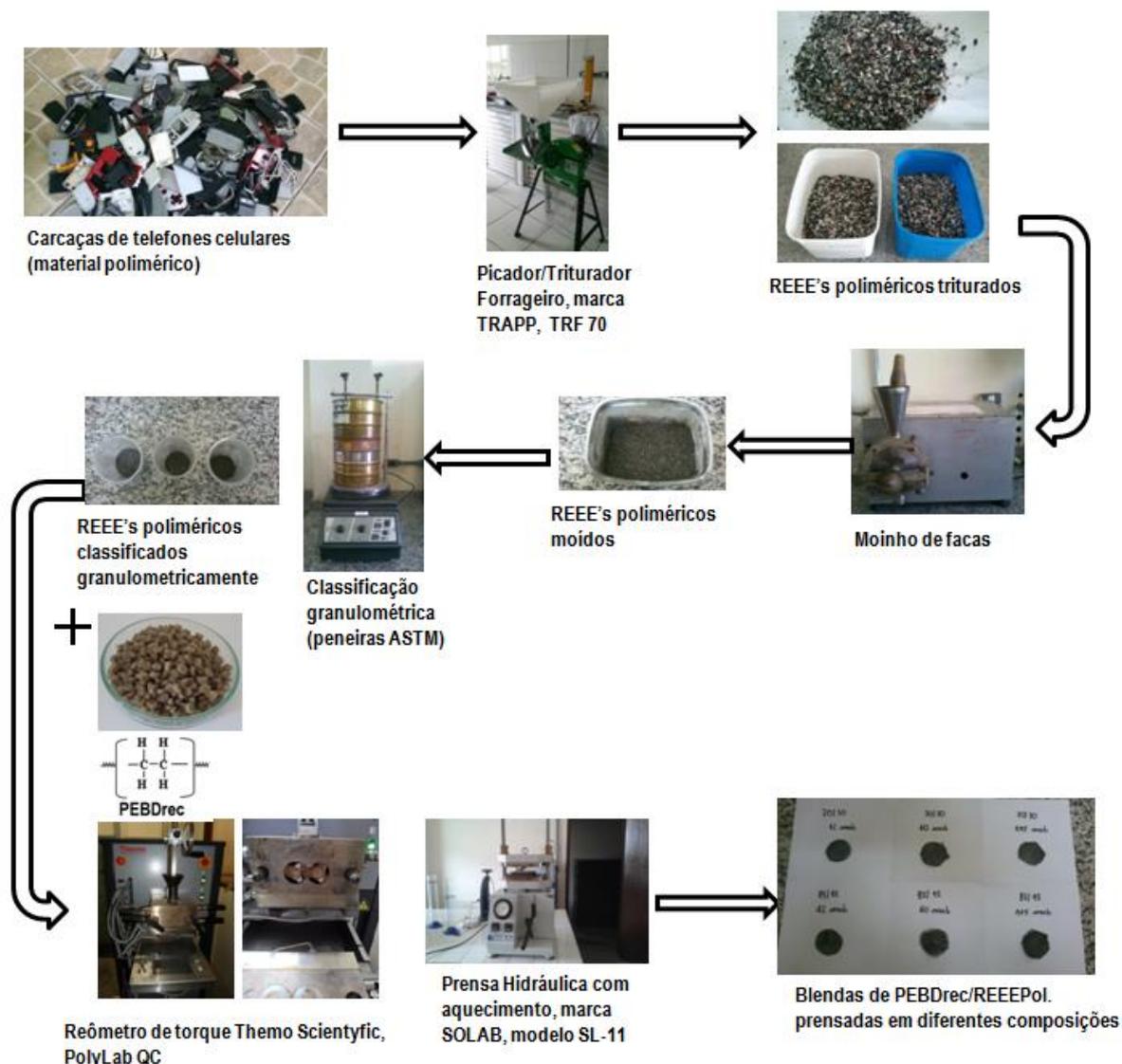


Figura 9. Obtenção das blendas de PEBDrec/PC-ABS

5.3.1 Preparo das carcaças de PC-ABS (REEEs)

No preparo das carcaças de PC-ABS (REEEs) foram realizadas as operações de moagem e separação granulométrica das carcaças poliméricas de telefones celulares. Foram utilizados telefones celulares de diferentes modelos e marcas sem nenhum tipo de classificação dos mesmos objetivando uma representação mais real do que é encontrado em grande parte dos REEE. Estes telefones foram obtidos de um trabalho anterior realizado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da UFRRJ. A Figura 10 mostra as carcaças de telefones celulares recolhidas. As carcaças de telefones celulares obsoletos foram desmontadas manualmente e tiveram seu tamanho reduzido através de corte manual com tesoura específica.



Figura 10. Carcaças de telefones celulares

5.3.1.1 Cominuição e Moagem

Após o desmantelamento manual das carcaças de aparelhos de telefone celular o material foi picotado com tesoura específica, com o intuito de facilitar a cominuição e posterior moagem mais seletiva. A cominuição foi realizada através de Triturador marca Trapp – Forrageiro TRF 70, modelo TRF-70/100AT, utilizando 03 peneiras de dimensões diferentes (mesh) N.5, N.3 e N.1,5, mostrado na Figura 11, com o objetivo de reduzir significativamente o tamanho das partículas (Figura 12). Este processo foi realizado no Laboratório de Monitoramento Ambiental I – Água e Efluentes do Departamento de Engenharia Química da UFRRJ.



Figura 11. Triturador Trapp – Forrageiro TRF 70



Figura 12. Carcaças poliméricas de aparelhos celulares cominuídas.

Após a cominuição, as amostras sofreram o processo de moagem em moinho de facas (Figura 13), com o objetivo de obter frações com diâmetro na faixa de 0,120 mm – 0,300 mm (Figura 14). As perdas de massa durante o processo de cominuição não foram mensuradas.

Este processo foi realizado no Laboratório de Engenharia Química do Departamento de Engenharia Química da UFRRJ.



Figura 13. Moinho de facas



Figura 14. Carcaças de telefones celulares submetidas ao moinho de facas

5.3.1.2 Separação granulométrica

A análise granulométrica é utilizada para classificar os materiais em diferentes tamanhos de partículas, sendo realizada com peneiras padronizadas quanto à abertura das malhas (mesh) e à espessura dos fios.

O material oriundo do moinho de facas foi encaminhado à separação granulométrica, onde foi utilizado o separador com peneiras vibratórias (Figura 15). Foram utilizadas as peneiras de 32, 42, 48, 60, 80 e 115 mesh. Cada ensaio foi realizado sob agitação média de 20 minutos. Ao fim do processo, as frações de interesse foram os materiais retidos nas peneiras de 42, 60 e 115 mesh, nas frações (F1 – 0,355 mm; F2 – 0,250 mm e F3 – 0,125 mm, respectivamente). Este ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia Química do Departamento de Engenharia Química da UFRRJ.



Figura 15. Separador granulométrico

5.3.2 Preparo das blendas de polietileno de baixa densidade reciclado e REEEs (PEBDrec/PC-ABS)

Para a obtenção das blendas foram misturados o polietileno de baixa densidade reciclado (PEBDrec) e as carcaças de telefones celulares constituídas de PC/ABS nas granulometrias de 42, 60 e 115 mesh, nas composições de 85/15% e 70/30%, com massa total de 40 gramas. As blendas foram obtidas no misturador de torque Thermo Scientific, modelo PolyLab QC, com rotor modelo roller (Figura 16), no Laboratório de Tecnologia de Polímeros/DEQ/UFRRJ nas seguintes condições de processamento: tempo de 10 minutos à 160°C e rotação de 50 rpm. As partículas das carcaças de telefones celulares (PC-ABS) foram adicionadas após 2 minutos de fusão do PEBD reciclado para melhor homogeneização do material. Foram preparadas 06 misturas de materiais contendo PEBD reciclado e carcaças de telefones celulares (PEBDrec/PC-ABS) em composições diferentes, e também do PEBD reciclado puro (Tabela 5).



Figura 16. Obtenção das blendas de PEBDrec/PC-ABS no misturador de torque Thermo Scientific

Tabela 5. Composição em massa das blendas de PEBDrec/PC-ABS, em diferentes granulometrias da carcaças de telefone celular

	Sigla das blendas de PEBDrec/PC-ABS	Composição, em massa, das blendas de PEBDrec/PC-ABS
1	PEBDrec	Polietileno de baixa densidade reciclado puro
2	PC-ABS	Carcaças de telefones celulares puros
3	PEBDrec/PC-ABS (85/15%)-42 mesh	85% de PEBDrec + 15% de Carcaça de telefone celular com granulometria de 42 mesh
4	PEBDrec/PC-ABS (85/15%)-60 mesh	85% de PEBDrec + 15% de Carcaça de telefone celular com granulometria de 60 mesh
5	PEBDrec/PC-ABS (85/15%)-115 mesh	85% de PEBDrec + 15% de Carcaça de telefone celular com granulometria de 115 mesh
6	PEBDrec/PC-ABS (70/30%)-42 mesh	70% de PEBDrec + 30% de Carcaça de telefone celular com granulometria de 42 mesh
7	PEBDrec/PC-ABS (70/30%)-60 mesh	70% de PEBDrec + 30% de Carcaça de telefone celular com granulometria de 60 mesh
8	PEBDrec/PC-ABS (70/30%)-115 mesh	70% de PEBDrec + 30% de Carcaça de telefone celular com granulometria de 115 mesh

5.3.3 Moldagem por compressão das blendas

Depois de preparadas, as misturas foram prensadas para a confecção de placas de PEBDrec/PC-ABS. A prensagem das misturas foi realizada em uma prensa hidráulica com aquecimento, da marca SOLAB, e seguiu as seguintes condições: tempo de prensagem de 10 minutos à 135°C e pressão de $\pm 4/5$ toneladas. Esta etapa foi realizada no Laboratório de Tecnologia de Polímeros – DEQ/UFRRJ. A Figura 17 apresenta a prensa utilizada e as pastilhas obtidas com as misturas de PEBDrec/PC-ABS.

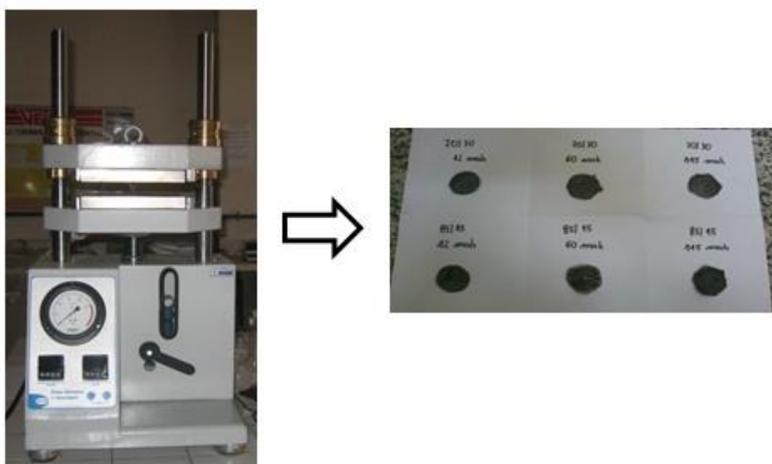


Figura 17. Foto da prensa hidráulica com aquecimento SOLAB e material obtido após o processo de moldagem por compressão

5.3.4 Caracterização dos materiais

O PEBD reciclado, as carcaças de telefones celulares constituídas de PC-ABS e as blendas de PEBDrec/PC-ABS foram caracterizadas através das técnicas a seguir:

5.3.4.1 Espectrometria na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Essa análise foi realizada com a finalidade de caracterizar quimicamente os grupos funcionais das amostras puras de PEBDrec, das carcaças de telefones celulares (PC-ABS) e das blendas de PEBDrec/PC-ABS. A espectroscopia na região do infravermelho também foi utilizada para verificar a ocorrência de possíveis interações entre grupos específicos dos componentes das misturas. As análises de FTIR foram realizadas no espectrômetro da marca Varian, modelo Excalibur Series, com método de Refletância Total Atenuada (ATR), no Laboratório de Apoio Instrumental I – Instituto de Macromoléculas Professora Eloísa Mano – IMA – UFRJ. Foram realizadas 120 varreduras e a resolução usada foi de 4 cm⁻¹.

5.3.4.2 Difração de raios-X (DRX)

Esta técnica permite realizar análise estrutural em materiais, determinando sua estrutura cristalina e sua fração (percentual) cristalina utilizando o espalhamento coerente de radiação X por estruturas organizadas (cristais) (CANEVAROLO, 2003).

O equipamento utilizado foi um difratômetro, marca RIGAKU, modelo Miniflex II. As condições de realização dos ensaios foram 30 kV de alta tensão e 15 A de corrente de filamento. A varredura foi feita com gama angular (2θ°) 30-60, incremento de 0,08°, tempo de aquisição de dois segundos e o modo utilizado foi por degraus. Também foi possível calcular o grau de cristalinidade X_c das amostras por DRX em função das áreas correspondentes aos picos cristalinos e da área do halo amorfo (pico alargado sob os picos cristalinos) a partir da Equação 1 (MUCCILLO, 2009; SALMORIA *et al.*, 2008; SANDER, 2010). Foi utilizado o programa Origin®, versão 6.0 para elaboração das curvas e cálculo das integrais. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Catálise/DEQ/UFRJ.

$$X_c = \frac{A_c}{A_c + A_a} \cdot 100 \quad \text{Equação (1)}$$

Onde: A_c representa a soma das áreas dos picos cristalinos e A_a corresponde à área do halo amorfo.

5.3.4.3 Análise Termogravimétrica (TGA)

A análise termogravimétrica (TGA) é aplicável no acompanhamento da variação de massa das amostras poliméricas em função da temperatura, sendo seus resultados fundamentalmente de ordem quantitativa. As amostras são submetidas a uma variação constante de temperatura em um forno, enquanto uma balança monitora a perda de massa. As amostras foram aquecidas na temperatura ambiente até 700°C, numa razão de aquecimento de 10°C/minuto em atmosfera de nitrogênio (TGA Q500 V20). O objetivo foi avaliar a resistência térmica do PEBDrec puro e avaliar a degradação térmica das blendas de PEBDrec/PC-ABS.

5.3.4.4 Densidade

A densidade é uma propriedade física importante e pode ser utilizada para distinguir um material puro de uma mistura.

Os valores de densidade das blendas foram calculados através do dimensionamento do tamanho dos corpos de prova utilizados para o ensaio de impacto Izod e sendo assim, foi possível medir os valores do comprimento, espessura e largura, obtendo assim o volume do corpo de prova, como também o peso destes materiais, de acordo com Serafim et al. (2006). Através de cálculos matemáticos, a partir da Equação 2, os valores de densidade foram obtidos em quintuplicata.

$$d=m/v$$

Equação (2)

Onde: m = massa da amostra (g); v = volume da amostra (cm³)

5.3.4.5 Dureza Shore D

A dureza shore D é uma medida da resistência de um material a uma deformação plástica (permanente) localizada. Este ensaio foi realizado a partir da Norma ASTM D2240-2010. O ensaio de dureza shore D foi realizado em quintuplicata. A Figura 18 ilustra o aparelho utilizado na realização do ensaio.



Figura 18. Durômetro Shore

5.3.4.6 Absorção de água

As blendas foram submetidas ao teste de absorção de água. As amostras secas foram pesadas e, na sequência, foram imersas em água deionizada, a temperatura ambiente. Foram coletados dados de absorção para 2h e 24h e pesadas após estes períodos. A variação de massa, em percentagem, foi medida de acordo com a norma ASTM D 570-2010 e a percentagem da variação de massa foi calculada segundo a Equação 3. O ensaio de absorção de água foi realizado em triplicata.

$$\text{Variação de massa (\%)} = ((mt-m_0)/m_0) \times 100$$

Equação (3)

Onde: mt é a massa da amostra úmida e m₀ é a massa da amostra seca.

5.3.4.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As diversas técnicas de microscopia eletrônica permitem o estudo da estrutura fina e da morfologia dos materiais. As micrografias foram obtidas em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) FEI, modelo JEOL JSM-6490LV, com corrente de feixe de elétrons de

10 μ m e 15 μ m e voltagem de aceleração de 15eV e 30eV . Foram obtidas micrografias do PEBDrec, das carcaças de telefones celulares moídas e das blendas de (PEBDrec/PC-ABS) nas diferentes proporções. Todas as amostras foram previamente recobertas com camada ultrafina de ouro (Au) antes de serem analisadas. Isto é feito para prevenir o acúmulo de campos elétricos estáticos na amostra devido ao feixe de elétrons durante a produção da imagem. As amostras das blendas foram fraturadas em atmosfera de nitrogênio (CANEVAROLO, 2003). No microscópio eletrônico de varredura é possível verificar a presença de vazios e a distribuição das fases presentes na blenda, além da verificação dos elementos químicos presentes no material, com auxílio do EDS (Espectroscopia por dispersão de energia de Raios X) (CANEVAROLO, 2003). Esta análise foi realizada no Laboratório de Microscopia da Universidade Estadual da Zona Oeste (UEZO) e no Laboratório de Microscopia Eletrônica do Departamento de Engenharia de Produção da UFRJ, onde foram obtidas as imagens e a análise de EDS das blendas de PEBDrec/PC-ABS, respectivamente. As etapas de preparo das amostras para micrografias são apresentadas na Figura 19.

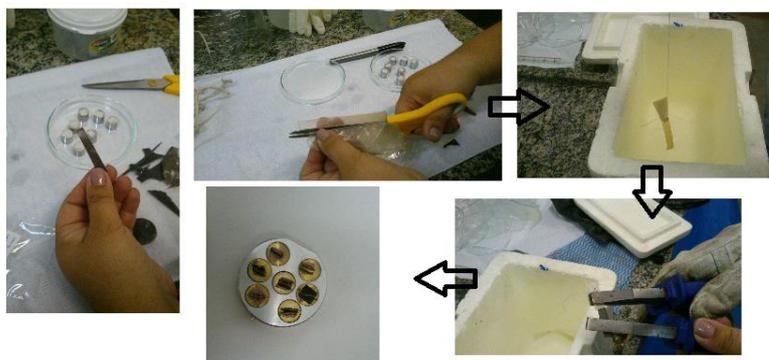


Figura 19. Preparo das amostras para realização da análise de MEV

5.3.4.8 Propriedades Mecânicas

A análise das propriedades mecânicas dos materiais é de fundamental importância no processo de seleção dos materiais poliméricos para o projeto de um produto e para propósitos de controle de qualidade.

5.3.4.8.1 Resistência à Tração

O ensaio de tração foi utilizado para determinar as características básicas dos materiais, seguindo instruções da norma ASTM D638-2014. Este ensaio consiste na aplicação de carga de tração uniaxial crescente em um corpo de prova específico até a ruptura (CANEVAROLO, 2003). O ensaio foi realizado à temperatura ambiente e velocidade de ensaio de 10 mm/min.

Os corpos de prova foram confeccionados por moldagem por compressão à partir da mistura obtida no misturador de torque e na prensa hidráulica Carver, modelo 3851 nas seguintes condições: tempo de pré-prensagem de 10 minutos; tempo de prensagem de 2 minutos à 135°C e pressão de ± 10 toneladas com resfriamento por água. Em seguida, os corpos de prova foram cortados em fresadora Roland EGX-350 de acordo com as dimensões específicas, conforme ilustrado na Figura 20.

Os corpos de prova obtidos são apresentados na Figura 21. Esta etapa foi desenvolvida no Laboratório de Polímeros – Gerência: Tecnologia Petroquímica no CENPES – PETROBRAS.



Figura 20. Fresadora Roland EGX-350



Figura 21. Corpos de prova confeccionados para ensaio de resistência à tração

5.3.4.8.2 Resistência ao Impacto

A resistência ao impacto é uma das propriedades mais pertinentes para conhecimento do comportamento mecânico dos polímeros. O ensaio de resistência ao impacto foi realizado de acordo com a ASTM D256 no aparelho mostrado na Figura 22. O objetivo foi a avaliação do efeito da quantidade de carcaças de telefones celulares na resistência do polímero. O ensaio de impacto do tipo Izod tem como finalidade mensurar a susceptibilidade relativa de um corpo de prova padrão mediante a solicitação ao impacto através de uma máquina de ensaio pendular (CANEVAROLO, 2003).

Os corpos de prova foram confeccionados por moldagem por compressão em prensa hidráulica Carver Modelo 3851 nas seguintes condições: tempo de pré-prensagem de 10 minutos; tempo de prensagem de 2 minutos à 135°C e pressão de ± 10 toneladas com resfriamento por água. Em seguida, os corpos de prova foram cortados em fresadora Roland EGX-350 de acordo com as dimensões específicas. A Figura 23 mostra a fotografia de alguns dos corpos de prova. Os corpos de prova, de dimensões 63,5 x 12,7 x 3,2 mm, foram entalhados a $2,5 \pm 0,05$ mm de raio de curvatura e ângulo de 45°. O corte das amostras foi feito em um entalhador acoplado com faca para entalhe em “V”. Os resultados foram obtidos a partir de uma média de 5 corpos de prova na temperatura de $23 \pm 0,3$ °C e umidade relativa de $70 \pm 0,5$ %, com martelo para medição Izod de 2,7J.



Figura 22. Máquina de ensaio impacto Izod

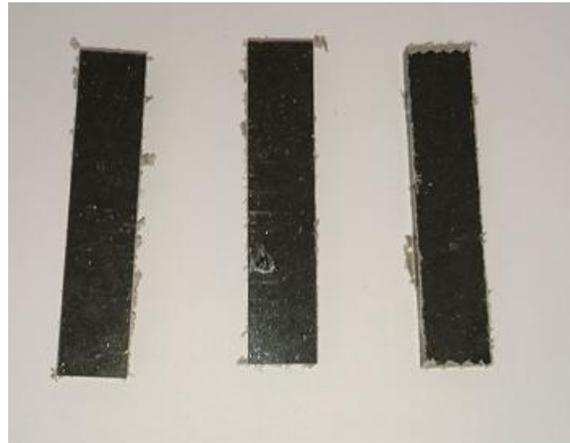


Figura 23. Corpos de provas confeccionados para ensaio de resistência ao impacto Izod

5.3.5 Caracterização das carcaças quanto à composição

5.3.5.1 Ensaio de lixiviação para determinação da periculosidade

A caracterização das blendas de PEBDrec/PC-ABS por lixiviação foi realizada com o objetivo de verificar a presença de metais, em diferentes concentrações. Não foi realizado nenhum tipo de classificação das carcaças dos telefones celulares objetivando dar um retrato mais fiel do que é encontrado em grande parte dos REEEs.

Conforme estabelecido pela norma ABNT NBR 10005, foram realizados alguns ensaios para a determinação da solução extratora que deve ser utilizada na obtenção dos lixiviados.

O ensaio consistiu em colocar 5 g de amostra em um béquer, em seguida a adição de 96,5 mL de água deionizada e agitação vigorosa por 5 min. Decorrido este tempo foi feita a verificação do pH da solução (ABNT NBR 10005, 2004).

Para a determinação da solução de extração foi levado em consideração as seguintes questões: se o pH for menor ou igual a 5,0 é utilizada a solução de extração nº 1 descrita na mesma norma. Se o pH for maior que 5,0 são adicionados 3,5 mL de HCl 1 mol/L, a solução é homogeneizada e aquecida a 50°C durante 10 minutos. Em seguida, após o resfriamento da solução o pH é verificado novamente. Caso o pH seja menor ou igual a 5,0, a solução de extração nº1 é utilizada e se for maior que 5,0 a solução de extração nº2 deve ser utilizada (ABNT NBR10005, 2004).

Foi realizado ensaio preliminar, de acordo com a norma ABNT NBR 10005, para determinação da solução extratora a ser utilizada no ensaio de lixiviação. O valor do pH encontrado nas soluções extratoras preparadas estava na faixa necessária, no valor de $4,93 \pm 0,05$. Com isso, os ensaios iniciais indicaram o uso da solução de extração número 1 (indicada na norma ABNT NBR 1005) para ser utilizada no ensaio de periculosidade dos materiais puros (PEBDrec e PC-ABS) e das blendas de PEBDrec/PC-ABS.

Após os ensaios preliminares, uma determinada quantidade das amostras de PEBDrec, das carcaças de telefones celulares (PC-ABS) e das blendas de PEBDrec/PC-ABS foi transferida para um recipiente. Foi acrescentada a solução extratora com volume proporcional a 20 vezes a massa da amostra. O recipiente foi mantido sob agitação constante durante aproximadamente 2 horas, à temperatura de 40°C com uma velocidade de (30 ± 2) rpm em

um Shaker (adaptado de PETTER, 2012; DE JESUS, 2015). Este ensaio foi realizado no Laboratório de Sistema Particulado/DEQ/UFRRJ. Após este período, foi realizada a filtração e o lixiviado encaminhado à análise química. A análise química do extrato lixiviado foi realizada por meio da técnica de ICP-OES, realizada no Departamento de Ciência do Solo/Instituto de Agronomia/UFRRJ. Foram pesquisados os elementos alumínio, cobre, ferro, níquel, chumbo, cádmio e zinco.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Preparo das blendas de polietileno de baixa densidade reciclado e REEEs (PEBDrec/PC-ABS)

As curvas de torque em função do tempo de mistura foram registradas ao longo de cada processamento, com o objetivo de avaliar o comportamento de fluxo da mistura. As Figuras 24 e 25 mostram as curvas de torque das misturas de PEBDrec/PC-ABS nas composições de 85/15% e 70/30%, respectivamente.

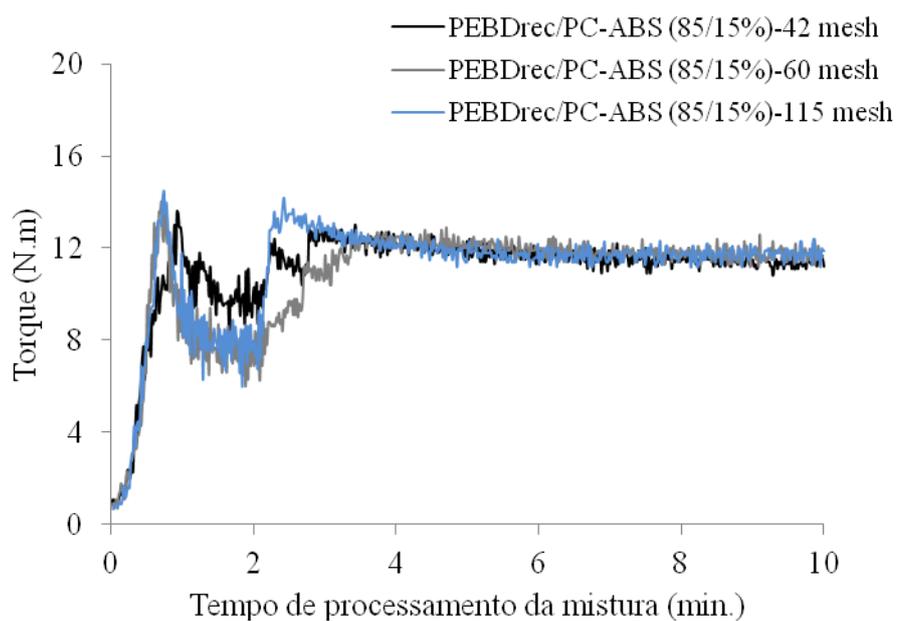


Figura 24. Curvas de torque das misturas de PEBDrec/PC-ABS (85/15%) nas composições de 42 mesh, 60 mesh e 115 mesh.

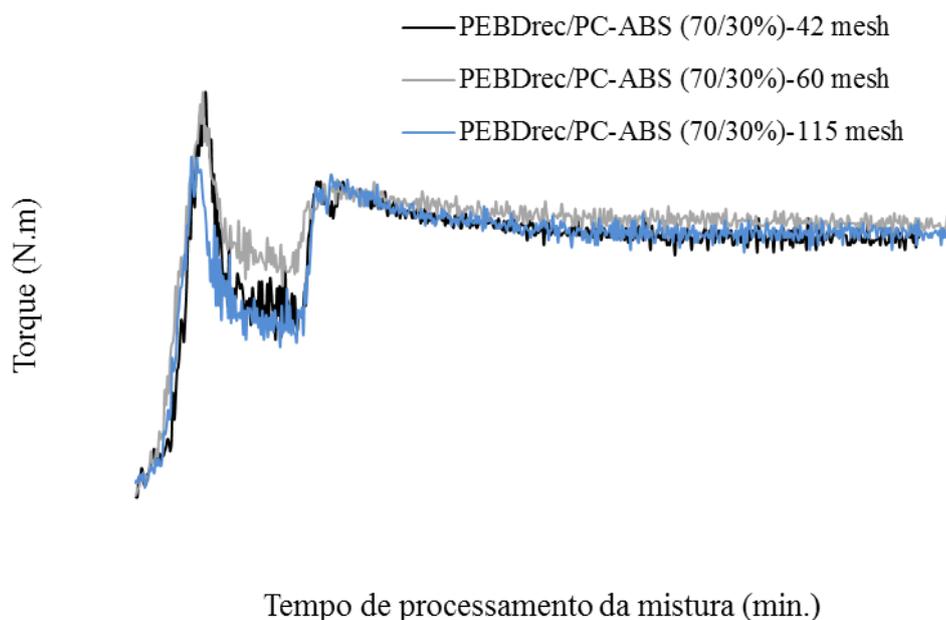


Figura 25. Curvas de torque das misturas de PEBDrec/PC-ABS (70/30%) nas composições de 42 mesh, 60 mesh e 115 mesh.

Estes resultados mostram que a rotação empregada pelos rotores e a temperatura de processamento foram ideais para obtenção das misturas dos materiais e exerceram influência significativa no comportamento do torque. O primeiro momento de torque pode estar vinculado ao início do processamento com a inserção do PEBDrec puro ao equipamento. Após os 2 minutos de processamento e fusão parcial do PEBDrec as carcaças de PC-ABS, nas diferentes granulometrias e composições, foram adicionadas ao polietileno parcialmente fundido, o que explica a queda nos valores de torque da mistura resultante. Após o processo de mistura, o valor de torque foi parcialmente estabilizado. Este comportamento indica estabilidade da viscosidade para as condições de processo utilizadas, ou seja, velocidade de 50 rpm e temperatura de 160°C, porém sugere que a adição das partículas de PC-ABS ao polietileno reciclado promovem um aumento da viscosidade para todas as misturas, provavelmente por que as partículas de PC-ABS estejam agindo como carga (SILVA et al, 2004; LUNA et al., 2014).

6.2 Caracterização dos materiais precursores das blendas (PEBDrec e carcaças de aparelhos celulares)

6.2.1 Espectrometria na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

A Figura 26(a, b) mostra os espectros de FTIR do PEBDrec e das carcaças de PC-ABS.

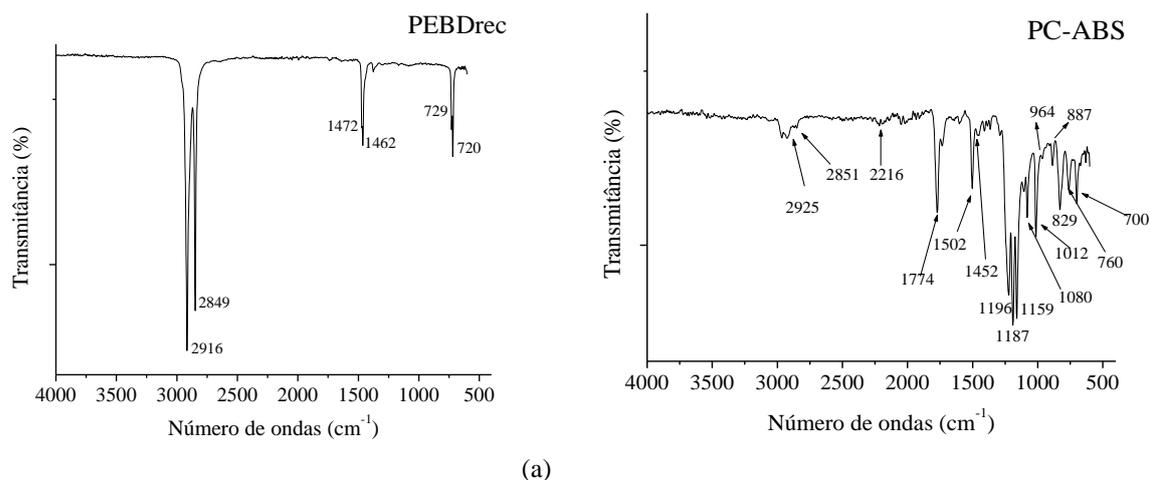


Figura 26. Espectros na região do infravermelho (FTIR) do PEBDrec (a) e das carcaças de PC-ABS (b).

As bandas presentes no espectro de FTIR do PEBDrec (a), próximas a 2916 e 2849 cm⁻¹ foram atribuídas a deformação axial assimétrica e simétrica de grupos C-H, respectivamente. Já as bandas em torno de 1472 e 1462 cm⁻¹ e 729 e 720 cm⁻¹ foram atribuídas à vibração e deformação angular de grupos C-H (CH₂ e CH₃), cristalinos e amorfos, respectivamente (QUENTAL et al., 2005; FRAGA, 2010).

O espectro de FTIR das carcaças de PC-ABS apresentam as bandas atribuídas à deformação axial assimétrica e simétrica de grupos C-H (CH₂ e CH₃), em torno de 2925 cm⁻¹ e 2851 cm⁻¹. As bandas em torno de 2216 cm⁻¹ e 1774 cm⁻¹ foram atribuídas à presença de grupos acrilonitrila (AN) e carbonila (C=O), respectivamente. As bandas entre 1600 - 1400 cm⁻¹ foram relacionadas a deformação axial de ligações C-C de anel aromático. Os picos próximos a 964 cm⁻¹ e 887 cm⁻¹ foram atribuídos aos grupamentos (-CH=CH-) do butadieno e em 760 cm⁻¹ e 700 cm⁻¹ indicam a presença de anel aromático relacionado ao estireno do copolímero do ABS (GABRIEL, 2012; VASQUEZ & BARBOSA, 2016).

A presença da banda de FTIR em torno de entre 1713-1770 cm⁻¹ de grupos carbonila, pode significar a degradação dos materiais reciclados pós-consumo ou a presença de carbonato. A ausência desta banda pode significar a ausência de degradação durante o processamento ou a ausência da carga (GABRIEL, 2012).

As Figuras 27 e 28 apresentam os espectros na região do infravermelho (FTIR) das blendas de PEBDrec/PC-ABS nas composições 85/15% e 70/30%, nas diferentes granulometrias da carcaça de PC-ABS.

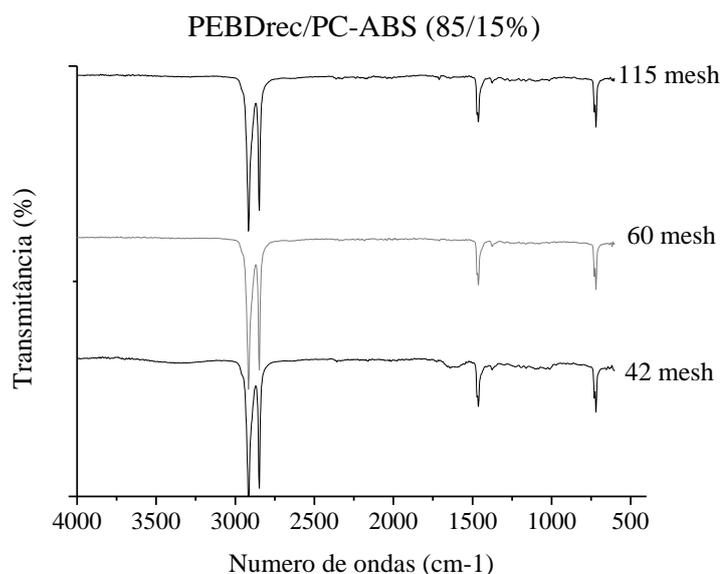


Figura 27. Espectros na região do infravermelho das blendas de PEBDrec/PC-ABS na composição 85/15%, nas diferentes granulometrias.

Os espectros de FTIR das blendas de PEBDrec/PC-ABS, independentemente da granulometria das carcaças de aparelhos celulares apresentaram as bandas mais características do polietileno, que se apresenta em maior proporção. Somente a blenda contendo maiores partículas de PC-ABS (42 mesh) é que apresentaram ligeiro aumento das bandas entre 1600 - 1400 cm⁻¹ que foram relacionadas a deformação axial de ligações C-C de anel aromático do estireno. As outras bandas foram atribuídas às ligações (C-H) de grupos CH₂ e CH₃.

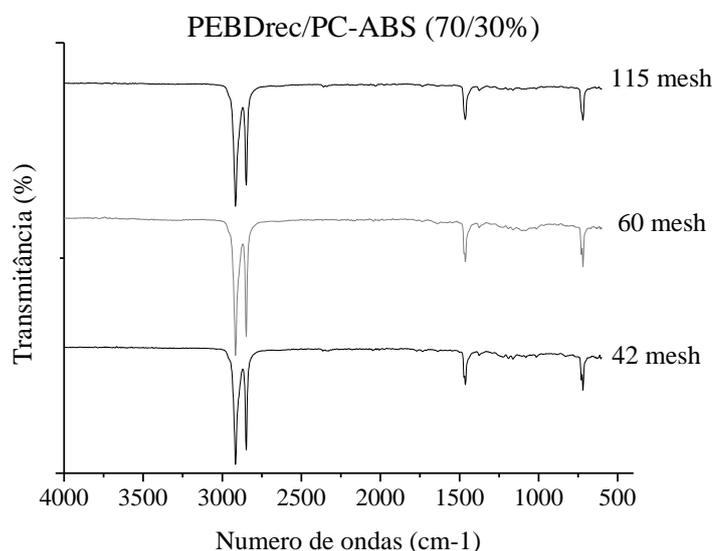


Figura 28. Espectros na região do infravermelho das blendas de PEBDrec/PC-ABS na composição 70/30%, nas diferentes granulometrias..

O aumento da proporção do PC-ABS na mistura ainda não foi suficiente para causar modificações significativas nos espectros de FTIR, ficando os espectros de FTIR das blendas de composição 70/30% semelhantes aos espectros de FTIR das blendas de composição 85/15%.

6.2.2 Difração de raios-X (DRX)

A Figura 29 apresenta os difratogramas dos materiais (PEBDrec e PC-ABS)

O polietileno de baixa densidade (PEBD) normalmente apresenta a cristalinidade caracterizada pela presença de dois picos bastante intensos e finos, em torno de $21,6^\circ$ e $23,7^\circ$ (2θ) (REDIGHIERI, 2006), relacionados com a fase ortorrômbica do material polimérico, sugerindo que o PEBD é semicristalino. Contudo, o polietileno de baixa densidade (PEBD) utilizado neste estudo (Figura 28a) apresentou os picos de cristalinidade pouco intensos. Essa diminuição da intensidade dos picos de cristalinidade pode ser atribuída ao processo de reciclagem secundária do PEBD (reciclagem mecânica pós-consumo), acarretando na degradação de suas cadeias e, conseqüentemente, diminuindo a intensidade dos picos. O processo de reciclagem e a presença de aditivos e/ou impurezas foram considerados os responsáveis pela diminuição da intensidade dos picos de cristalinidade e dos ângulos de cristalinidade ($20,3^\circ$ e $22,8^\circ$) do material utilizado nesta pesquisa.

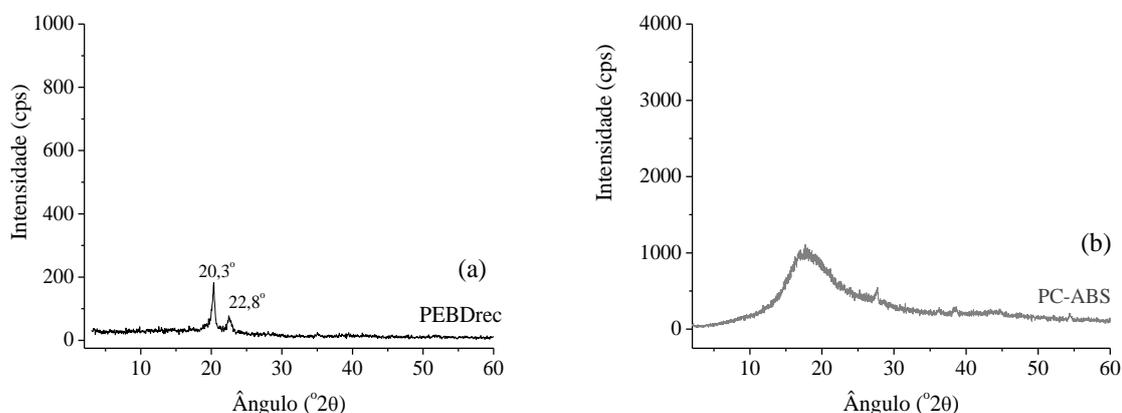


Figura 29. Difratogramas dos polímeros: (a) - PEBDrec e (b) - carcaças de aparelho celular (PC-ABS).

A curva de DRX do PC-ABS (Figura 28b) apresentou um halo amorfo (pico bastante alargado). A mistura entre o policarbonato e o copolímero de acrilonitrila-butadieno-estireno (PC-ABS) é considerada uma mistura onde as cadeias poliméricas apresentam conformação amorfa, o que caracteriza este material como predominantemente amorfo. A intensidade do pico alargado foi atribuída a quantidade de cadeias amorfas (HYRAYAMA, 2015)

As Figuras 30 e 31 apresentam os difratogramas das blendas de PEBDrec/PC-ABS nas composições de 85/15% e 70/30 %.

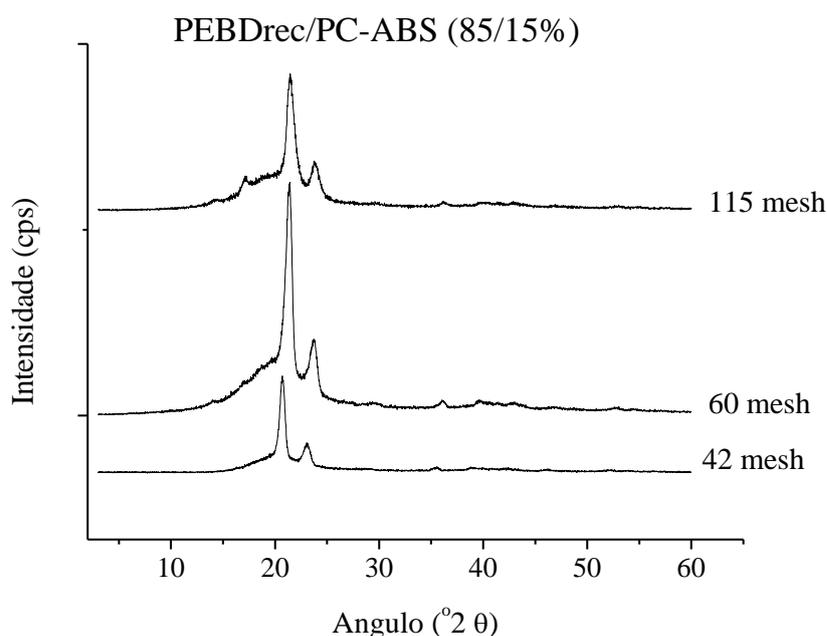


Figura 30. Difratogramas das blendas de PEBDrec/PC-ABS (85/15%), nas diferentes granulometrias do PC-ABS.

Através dessas curvas foi possível observar que os picos de cristalinidade da estrutura ortorrômbica do polietileno estão presentes nas blendas de 85/15% (42 mesh - 0,355 mm, 60 mesh - 0,250 mm e 115 mesh - 0,125 mm) em maior intensidade do que o PEBDrec puro (Figura 28). Esse resultado foi atribuído a dois possíveis comportamentos. Pode ter havido uma maior organização das cadeias causada pela rotação durante o processamento da mistura (SANTANA & MANRICH, 2005). Também foi possível observar que a diminuição da granulometria proporcionou um aumento da fase amorfa do material, detectado pelo halo amorfo abaixo dos picos de cristalinidade, referente à presença do PC-ABS, porém aumentou a intensidade dos picos, além de proporcionar o aparecimento de mais dois picos de cristalinidade atribuído à estrutura metaestável monoclinica do PEBDrec, em torno de $14,7^{\circ}$ e $17,5^{\circ}$ (2θ). O aparecimento desses novos picos foi atribuído ao tratamento térmico sofrido pelos materiais no processo de obtenção da blenda de PEBDrec/PC-ABS na menor granulometria, devido a melhor interação entre os materiais.

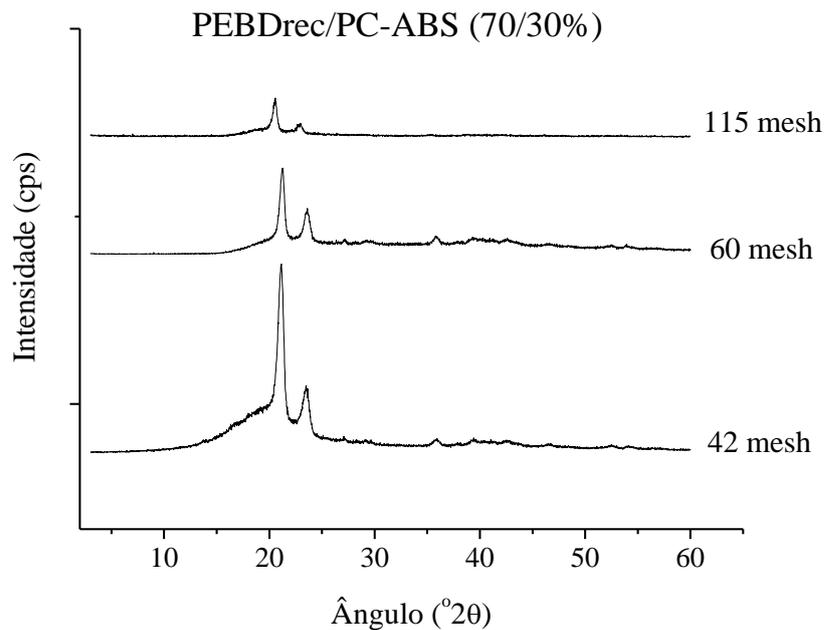


Figura 31. Difratomogramas das blendas de PEBDrec/PC-ABS na composição 70/30%, nas diferentes granulometrias do PC-ABS.

Na Figura 31 os difratogramas das blendas de PEBDrec/PC-ABS (70/30%) apresentaram um comportamento contrário ao da composição de 85/15%, onde a redução da granulometria do PC-ABS diminuiu a intensidade dos picos de cristalinidade do PEBDrec. Este comportamento foi associado ao aumento da proporção das carcaças de telefones celulares (PC-ABS) na mistura, contribuindo para a redução da cristalinidade das blendas, apesar dessa diminuição de intensidade dos picos de cristalinidade ainda não alcançarem a reduzida cristalinidade do PEBDrec.

A Figura 32 apresenta os valores do grau de cristalinidade dos polímeros PEBDrec, PC-ABS e das blendas de blendas de PEBDrec/PC-ABS nas composições de 85/15% e 70/30%, nas diferentes granulometrias do PC-ABS.

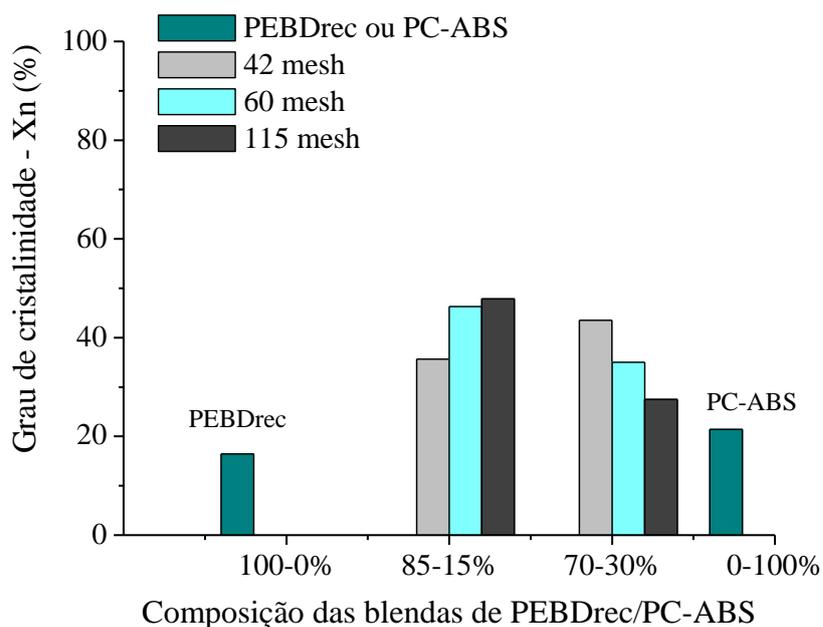


Figura 32. Grau de cristalinidade dos polímeros PEBDrec, PC-ABS e das blendas de PEBDrec/PC-ABS nas composições de 85/15% e 70/30%, nas diferentes granulometrias do PC-ABS.

Como observado pelas curvas de DRX o PEBDrec apresenta o menor valor de cristalinidade ($\cong 16\%$), e como já mencionado, esse comportamento foi atribuído à possível degradação das cadeias e/ou à presença de impurezas presentes no polímero durante o processo de reciclagem secundária. Ao contrário da interferência na ordenação das cadeias de polietileno de baixa densidade, as impurezas e os aditivos presentes no PC-ABS podem ter agido como nucleante de cristalização e interferido no grau de cristalinidade do PC-ABS ($\cong 26\%$), o qual é considerado um polímero amorfo, fazendo com que essa mistura considerada amorfa apresente um grau de cristalinidade superior ao do PEBDrec. O aumento do grau de cristalinidade das blendas de composição 85/15% sugere que possa estar ocorrendo a co-cristalização do PEBDrec com o PC-ABS, com a diminuição da granulometria das partículas de carcaça de aparelhos celulares, e conseqüentemente, melhor homogeneidade da mistura polimérica. De acordo com Passador et al. (2012), na co-cristalização as cadeias de ambos os polímeros participam na formação do mesmo cristalito. Esse comportamento depende principalmente do número e do tamanho das ramificações existentes no PEBDrec (PASSADOR et al., 2012). O aumento da proporção na mistura adicionado à variação no tamanho das partículas do PC-ABS, provocou um efeito contrário ao da composição 85/15%, com as partículas de menor granulometria (115 mesh), porém com massa duplicada causando uma diminuição do grau de cristalinidade. Esse comportamento foi atribuído à interferência das partículas na ordenação das cadeias de PEBDrec, quando se apresentam em maior proporção (CORREA et al., 2003; SANTOS, 2012).

6.2.3 Análise Termogravimétrica (TGA)

A Figura 33 apresenta as curvas termogravimétricas do PEBDrec e das carcaças de PC-ABS em atmosfera inerte (N₂).

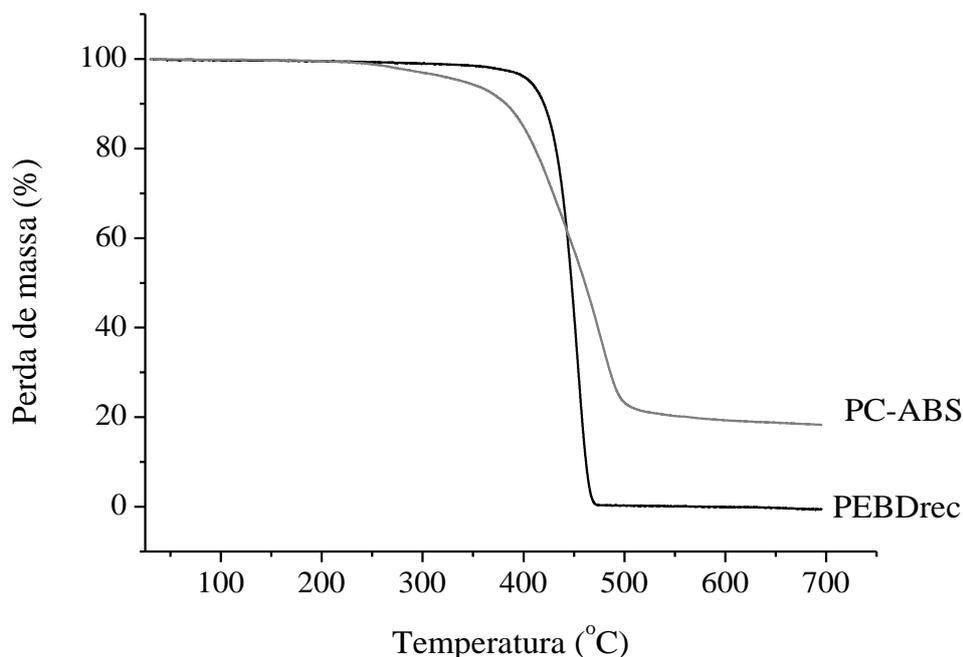


Figura 33. Curva termogravimétrica do PEBD reciclado, das carcaças de PC-ABS puros

É possível observar pela curva termogravimétrica que o PEBDrec teve o princípio da sua perda de massa em torno de 430°C. Comparando a temperatura inicial de degradação térmica do polietileno reciclado utilizado nesta pesquisa com a temperatura inicial do mesmo tipo de polímero reciclado utilizados em outros estudos a perda de massa do PEBD reciclado ocorre no limite de temperatura de 400-490°C (FRAGA, 2010; VALIM et al., 2015). A presença de impurezas ou mais de um processamento térmico podem ter diminuído a resistência térmica do PEBD reciclado. A quantidade de aditivos presentes nas carcaças de telefones celulares (PC-ABS) e os tipos de aditivos e impurezas presentes não sofreram completa degradação, com isso a curva termogravimétrica do PC-ABS apresentou uma quantidade significativa de resíduos não degradados. Também foi possível observar que a temperatura na qual a velocidade de perda de massa foi máxima foi em torno de 470°C para as carcaças PC-ABS e em volta de 453°C para o PEBDrec (KASPER, 2010; FRAGA, 2010).

A Tabela 6 apresenta os valores de temperaturas inicial e máxima do PEBDrec e das carcaças de PC-ABS.

Tabela 6. Temperaturas inicial e máxima do PEBDrec e das carcaças de PC-ABS

	Temp_{onset} (°C)	Temp_{máx} (°C)	Resíduo (%)
Carcaças PC-ABS	396,82	472,93	18,32
PEBDrec	430,98	453,10	0

As Figuras 34 e 35 exibem as curvas termogravimétricas do PEBDrec puro e das blendas de PEBDrec/PC-ABS nas composições de 85/15% e 70/30%, com variação da granulometria das partículas de PC-ABS, respectivamente.

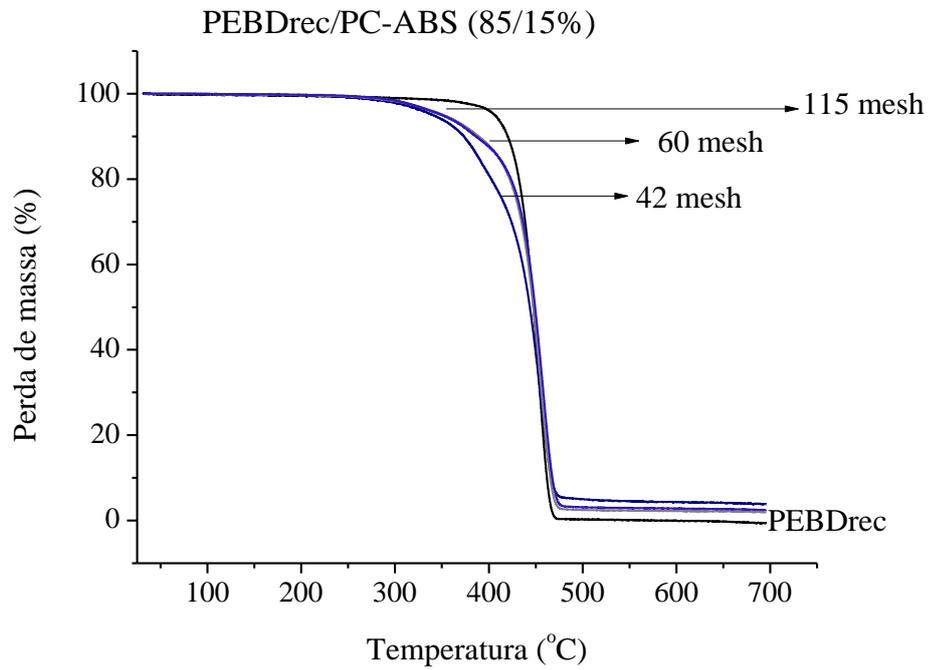


Figura 34. Curva termogravimétrica das blendas de PEBDrec/PC-ABS na composição 85/15%, respectivamente.

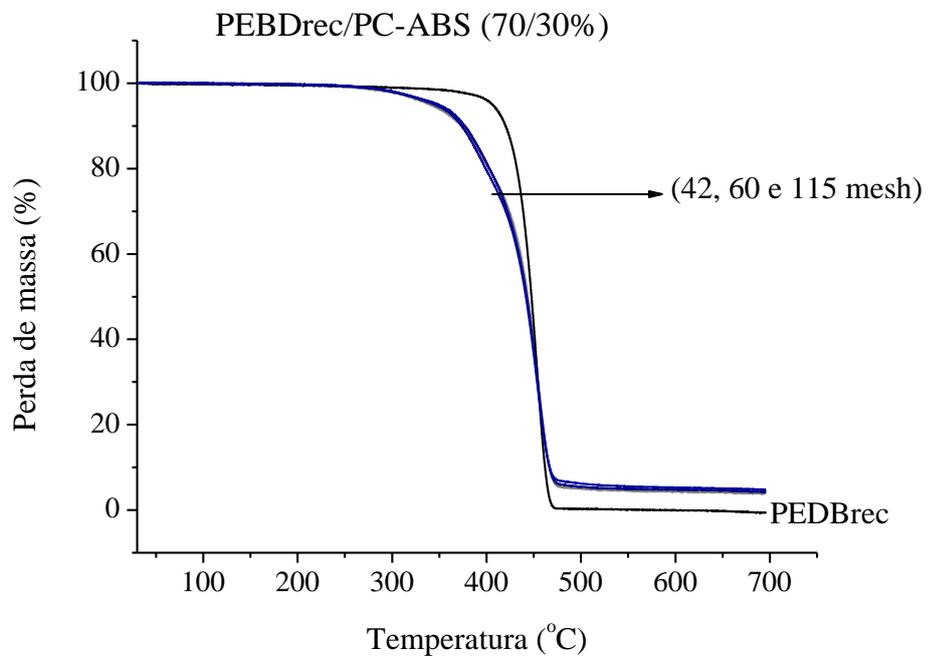


Figura 35. Curva termogravimétrica das blendas de PEBDrec/PC-ABS na composição 85/15%, respectivamente.

As blendas de composição 85/15% apesar de apresentarem deslocamento das curvas, não apresentaram variação significativa na temperatura inicial de degradação térmica quando comparadas ao PEBDrec puro, confirmando que a menor proporção do polímero amorfo proporcionou um aumento na cristalinidade do material resultante e, conseqüentemente, estabilizou a mistura. Porém as blendas de composição 70/30% apresentaram diminuição na estabilidade térmica quando comparadas às blendas de composição 85/15% e ao PEBDrec puro. A presença de uma quantidade maior de carcaças de PC-ABS causou interferência na ordenação das cadeias de PEBDrec e conseqüentemente diminuiu a estabilidade térmica do material resultante, independentemente do tamanho das partículas.

A Tabela 7 apresenta a temperatura inicial de degradação (T_{onset}) e a temperatura em que a velocidade de degradação do material é máxima (T_{max}).

Tabela 7. Valores da temperatura inicial de degradação (T_{onset}) e da temperatura em que a velocidade de degradação das blendas de PEBDrec/PC-ABS é máxima (T_{max}).

		Temp.onset (°C)	Temp.máx (°C)	Resíduo (%)
PEBDrec/PC-ABS (85/15%)	42 mesh	427,8	457,6	1,9
	60 mesh	427,2	456,2	2,0
	115mesh	428,1	457,8	2,5
PEBDrec/PC-ABS (70/30%)	42 mesh	418,4	453,9	3,8
	60 mesh	415,8	453,4	4,2
	115 mesh	414,9	453,7	4,9

Os resultados apresentados na Tabela 7 confirmam a estabilidade térmica das blendas de composição 85/15% e mostram que o aumento da proporção de PC-ABS nas misturas causou uma diminuição na estabilidade térmica dos materiais resultantes. Como já era esperado à partir da curva de TGA das carcaças de PC-ABS, todos as blendas apresentaram material residual proporcional à quantidade presente na mistura.

6.2.4 Densidade

A Tabela 8 apresenta os resultados de densidade para o PEBDrec puro e para as blendas de PEBDrec com PC-ABS nas diferentes composições e granulometrias.

Tabela 8. Densidade das blendas nas composições de 85/15% e 70/30% nas granulometrias de 42, 60 e 115 mesh.

Material	Valores de Densidade (g/cm ³)
PEBDrec	0,926
85/15 – 42 mesh	0,946
85/15 – 60 mesh	0,964
85/15 – 115 mesh	0,968
70/30 – 42 mesh	0,996
70/30 – 60 mesh	0,992
70/30 – 115 mesh	0,988

De acordo com a literatura a densidade do ABS puro se apresenta entre 1,04 e 1,19 g/cm³ e a densidade do PC se encontra em torno de 1,2 g/cm³ (KANG, SCHOENUNG, 2005; SCAFFARO; BOTTA; DI BENEDETTO, 2012). Já a densidade do PEBD puro se encontra entre 0,912 - 0,925 g/cm³ (DOAK, 1986). Neste estudo foi possível observar que a variação nos valores de densidade das blendas de PEBDrec/PC-ABS quando comparadas ao PEBDrec puro foi muito pequena, não sendo considerada significativa. Este resultado pode estar relacionado à cristalização das blendas, já que este fator é sinônimo de organização das cadeias, e conseqüentemente diminuição dos espaços vazios entre as cadeias. A Figura 36 ilustra estes resultados.

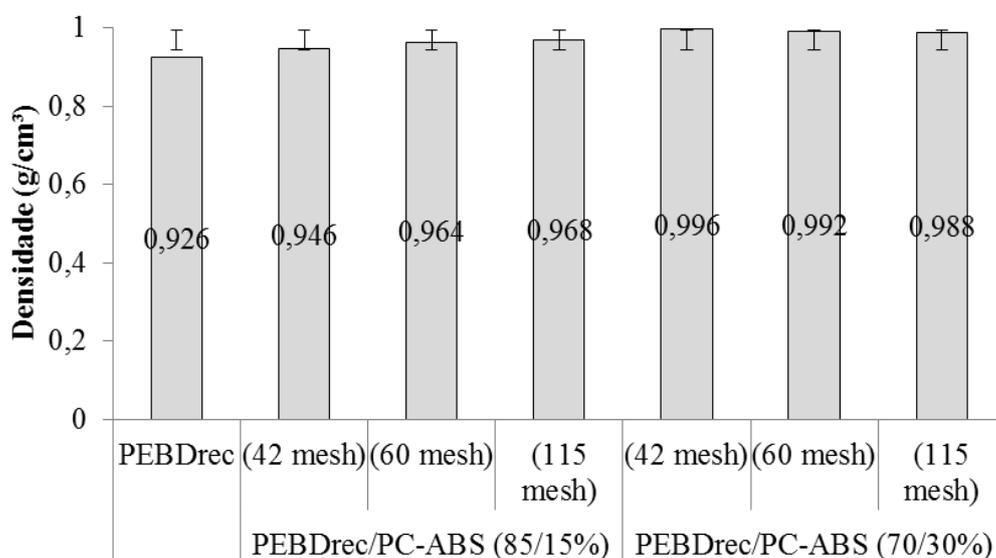


Figura 36. Valores de densidade obtidos das blendas de PEBDrec/PC-ABS nas proporções de 85/15% e 70/30% em diferentes granulometrias.

6.2.5 Dureza Shore D

Kasper et al. (2010) mediram a dureza dos materiais policarbonato virgem (74,5 Shore D) e do ABS (68,3 Shore D), além do material PC-ABS 100% reciclado (75 Shore D) e atribuiu esse valor elevado do material reciclado (mais próximos dos valores para PC) à presença de cargas no material reciclado.

Caraschi e Leão (2002) e Bassani (2013) citam em seus trabalhos que a dureza do PEBD virgem varia entre 44 - 50 Shore D. Ugbaja et al. (2013) mencionam em seu trabalho

que a dureza do polietileno de baixa densidade reciclado também se apresenta em torno de 45,0 Shore D.

A Tabela 9 e a Figura 37 apresentam os valores obtidos de dureza do PEBDrec puro e das blendas de PEBDrec/PC-ABS nas composições de 85/15% e 70/30%, nas diferentes granulometrias da carcaça de aparelhos celulares.

Tabela 9. Valores de dureza obtidos para as blendas nas composições de 85/15% e 70/30% nas granulometrias de 42, 60 e 115 mesh.

Material	Valores de Dureza(Shore D)
PEBDrec	18
85/15 – 42 mesh	20
85/15 – 60 mesh	20
85/15 – 115 mesh	18
70/30 – 42 mesh	18
70/30 – 60 mesh	18
70/30 – 115 mesh	18

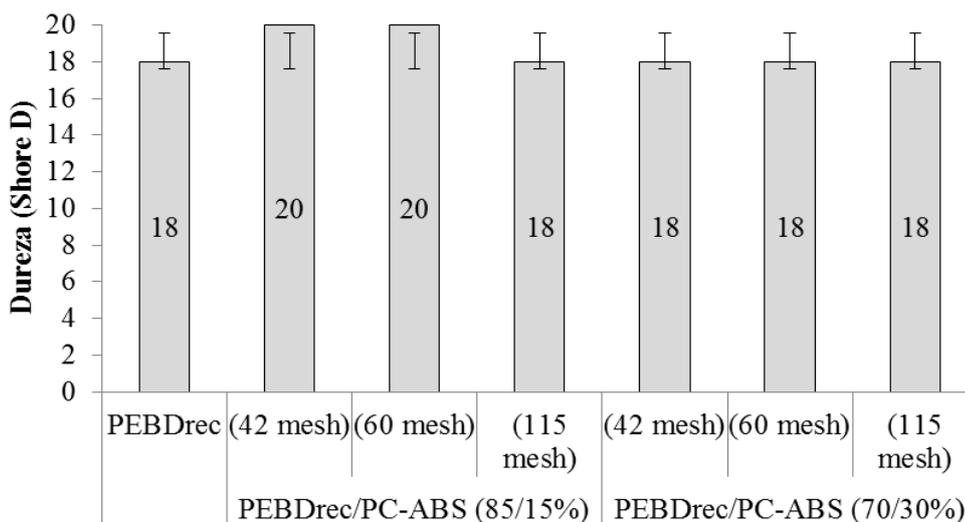


Figura 37. Valores de dureza Shore D obtidos das blendas de PEBDrec/PC-ABS nas proporções de 85/15% e 70/30%, nas diferentes granulometrias.

O resultado de dureza obtido pelo PEBDrec utilizado nesta pesquisa atingiu o valor de 18,0 Shore D. Valor este muito abaixo do encontrado na literatura. Esse comportamento foi atribuído ao início de degradação do material durante o processo de reciclagem. No entanto, as blendas de PEBDrec/PC-ABS não apresentaram variação significativa nos valores de dureza, ficando este valor próximo ao valor de dureza do polietileno reciclado. Esse comportamento foi atribuído ao grau de cristalinidade dos materiais resultantes após a obtenção das blendas poliméricas.

6.2.6 Absorção de água

A Figura 38 apresenta a variação da massa do PEBDrec e das blendas de PEBDrec/PC-ABS nas composições de 85/15% e 70/30%, nas diferentes granulometrias da carcaça de aparelhos celulares.

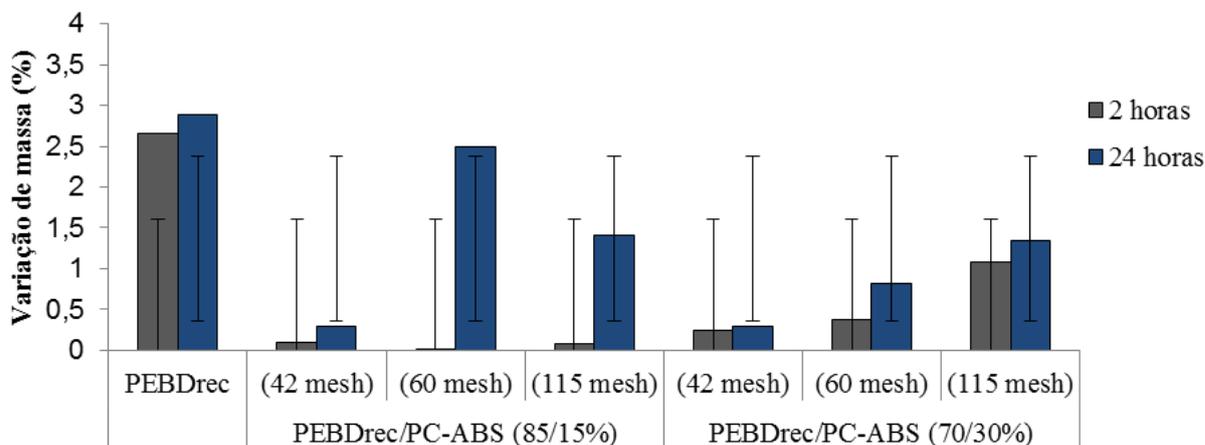


Figura 38. Dados de absorção de água obtidos das blendas de PEBDrec/PC-ABS nas proporções de 85/15% e 70/30% em diferentes granulometrias.

A variação de massa durante o teste de absorção de água para o PEBDrec e para as blendas de PEBDrec/PC-ABS não foi significativa. Esse comportamento foi atribuído ao aumento do grau de cristalinidade das blendas de PEBDrec/PC-ABS, o que dificultou a penetração da água entre as cadeias do PEBDrec. Estes materiais apresentaram uma boa dispersão e assim melhor organização das cadeias de PEBDrec com PC-ABS e isto contribuiu para a redução da absorção de água nas blendas (COUTINHO, MELLO, MARIA, 2003; FRAGA, 2010; IGWE, ORAGWU, 2013). Além disso, a baixa afinidade entre o PEBDrec e as moléculas de água dificulta a interação entre essas moléculas, acarretando em pequena absorção de água. A Tabela 10 apresenta esses valores em termos de percentagem e seus respectivos desvios-padrão.

Tabela 10. Valores da absorção de água pela amostra de PEBDrec e as blendas de PEBDrec/PC-ABS nas composições de 85/15% e 70/30%, nas diferentes granulometrias.

Amostras	Absorção de água em 2h (% + DP)	Absorção de água em 24h (% + DP)
PEBDrec	2,66 (± 0,0179)	2,88 (± 0,0184)
85/15%-42mesh	0,09 (± 0,0156)	0,30 (± 0,0157)
85/15%-60 mesh	0,012 (± 0,0241)	2,50 (± 0,0230)
85/15%-115 mesh	0,080 (± 0,0107)	1,41 (± 0,0104)
70/30%-42 mesh	0,24 (± 0,0203)	0,30 (± 0,0209)
70/30%-60mesh	0,37 (± 0,0198)	0,82 (± 0,0140)
70/30%-115 mesh	1,08 (± 0,0197)	1,34 (± 0,0191)

Pode-se observar pela Tabela 10 que as amostras com menor grau de cristalinidade (PEBDrec – 16,4%) e a blenda de PEBDrec/PC-ABS (70/30%-115 mesh – 27,5%) apresentaram maior percentagem de absorção de água em menor tempo (2 horas). Esse

resultado pode ser explicado pelo menor grau de empacotamento das cadeias dessas duas amostras por apresentarem menor cristalinidade, sobrando espaços vazios que podem favorecer a penetração da água. Ao final de 24,0 horas, além das amostras de menor grau de cristalinidade, as amostras contendo menor proporção de PC-ABS (85/15%), com menores granulometrias (60 e 115 mesh) também absorveram mais do que 1,0% de água. Esse resultado foi atribuído à menor quantidade de partículas de PC-ABS somado ao menor tamanho das partículas.

6.3.7. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Figura 39 apresenta as micrografias de MEV do PEBDrec (a) e do PC-ABS (b).

Pode-se observar pela Figura 39(a,b) que a superfície do PEBDrec apresentou um aspecto fibroso (com estiramento), porém dúctil. A ductilidade é uma característica do polietileno, porém o aspecto fibroso foi atribuído ao estiramento sofrido pelo material durante o processo de reciclagem secundária. O PC-ABS apresenta pequenas partículas dispersas em uma morfologia borrachosa. As pequenas partículas foram atribuídas ao PC e a morfologia borrachosa foi atribuída ao ABS.

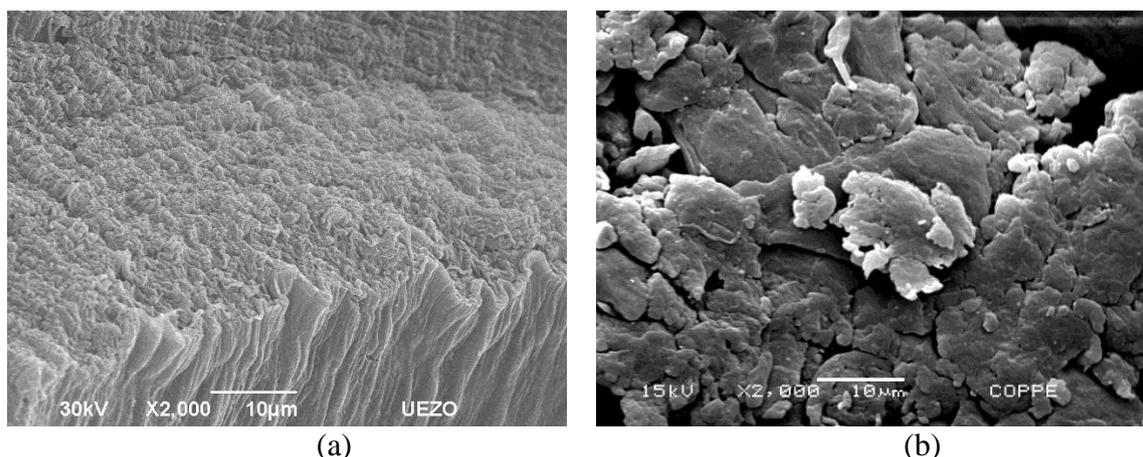


Figura 39. Micrografias do PEBDrec (a) e do PC-ABS (b) (Aumento de 2000X)

As Figuras 40 – 45 apresentam as micrografias de MEV das blendas de PEBDrec/PC-ABS, nas duas composições e diferentes granulometrias das partículas de PC-ABS.

Na Figura 40 podem ser observadas as partículas de PC-ABS, na granulometria entre 17,8 – 28,7µm (blenda 85/15%-42 mesh). Estas partículas estão dispersas, mas não aderidas à matriz fibrosa de polietileno reciclado.

Pode-se observar que a diminuição do tamanho das partículas causou uma mudança na morfologia da fase de PEBDrec, tornando-a mais fibrosa. Esse comportamento foi atribuído a fase ABS da carcaça de aparelhos celulares.

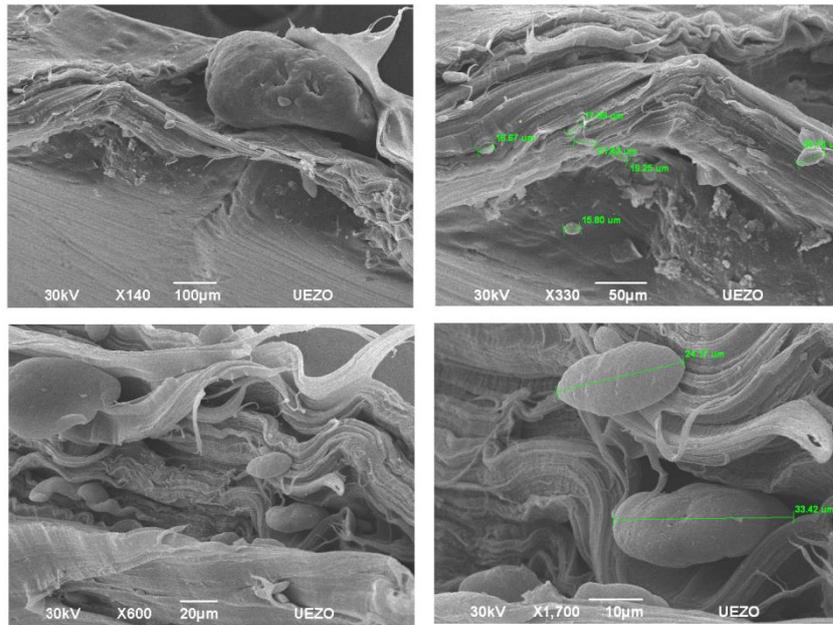


Figura 40. Micrografias de MEV da blenda de PEBDrec/PC-ABS (85/15%), na granulometria de 42 mesh.

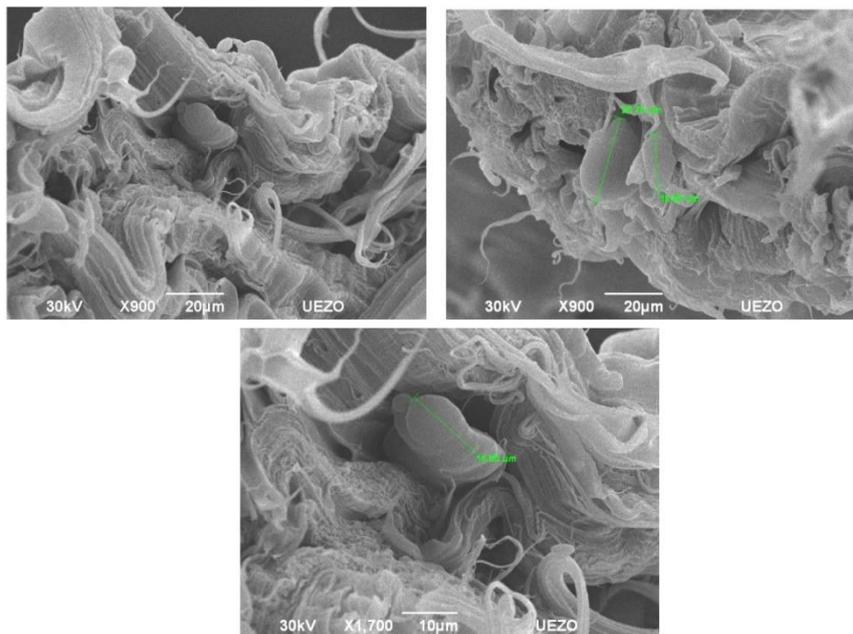


Figura 41. Micrografias de MEV da blenda de PEBDrec/PC-ABS (85/15%), na granulometria de 60 mesh.

Nas micrografias da blenda de composição 85/15%-60 mesh (Figura 41) ainda podem ser observadas as partículas de PC-ABS dispersas na fase de polietileno, porém essas partículas encontram-se melhor aderidas a poliolefina.

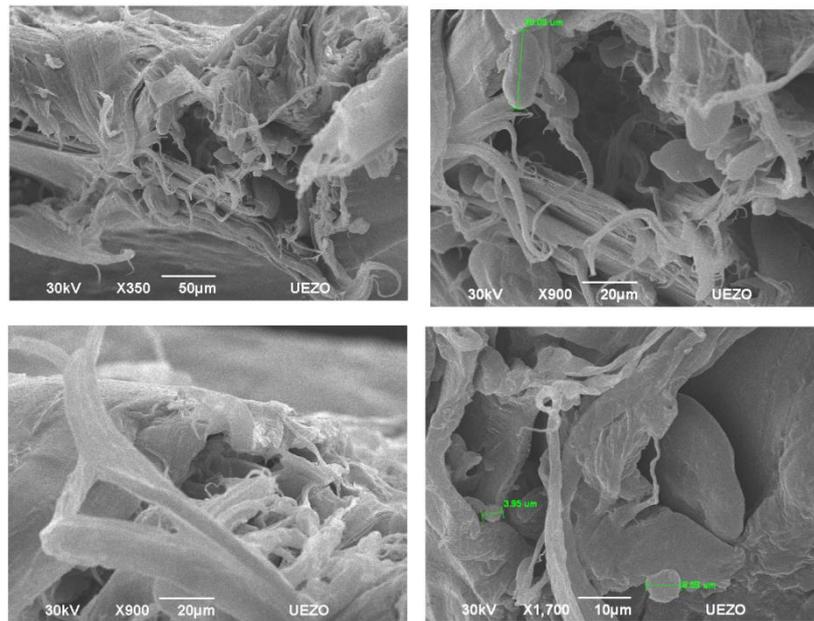


Figura 42. Micrografias de MEV da blenda de PEBDrec/PC-ABS (85/15%), na granulometria de 115 mesh.

Nas micrografias da blenda 85/15%-115 mesh (Figura 42) quase não se percebe as partículas de PC-ABS dispersas no PEBDrec. Também pode-se observar que essa mistura tornou-se bastante fibrosa, comprovando que houve maior interação entre os materiais nessa granulometria.

O aumento da proporção de PC-ABS nas blendas 70/30% mudou consideravelmente a morfologia do polietileno reciclado, deixando-o ainda mais fibroso. As partículas de maior tamanho (42 mesh) podem ser identificadas nas Figuras 42, porém a fase de polietileno reciclado está muito diferente. As partículas de menores tamanhos (115 mesh) só podem ser identificadas nas micrografias com maiores aumentos (1.700X).

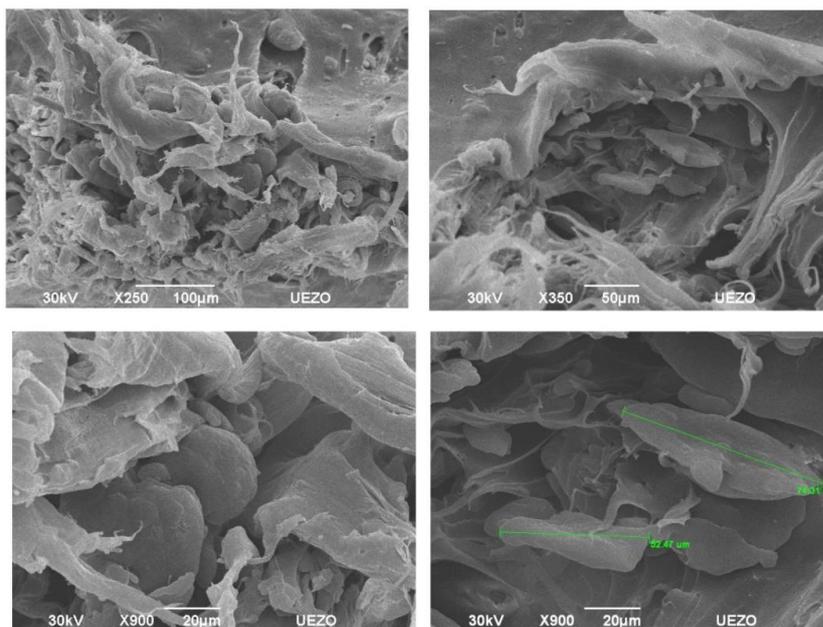


Figura 43. Micrografias de MEV da blenda de PEBDrec/PC-ABS (70/30%), na granulometria de 42 mesh

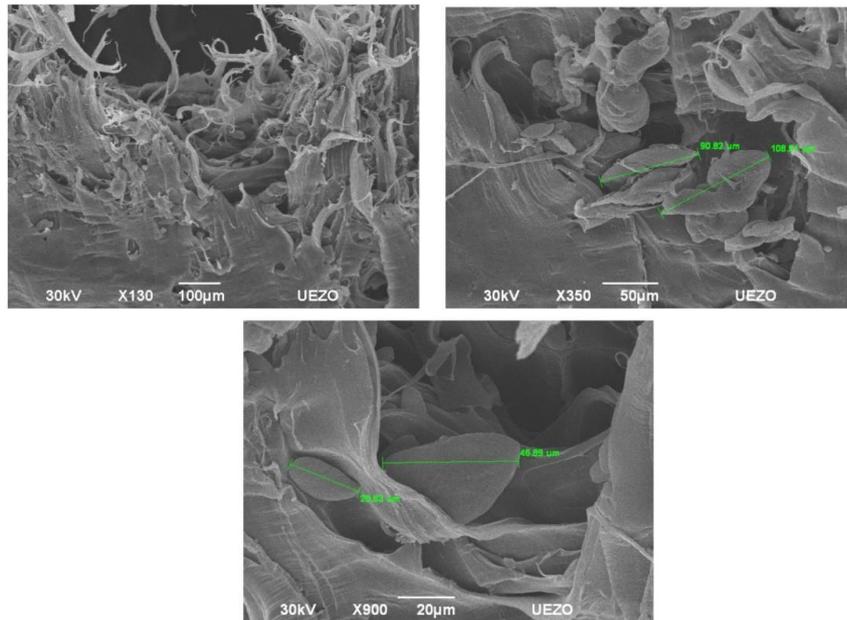


Figura 44. Micrografias de MEV da blenda de PEBDrec/PC-ABS (70/30%), na granulometria de 60 mesh

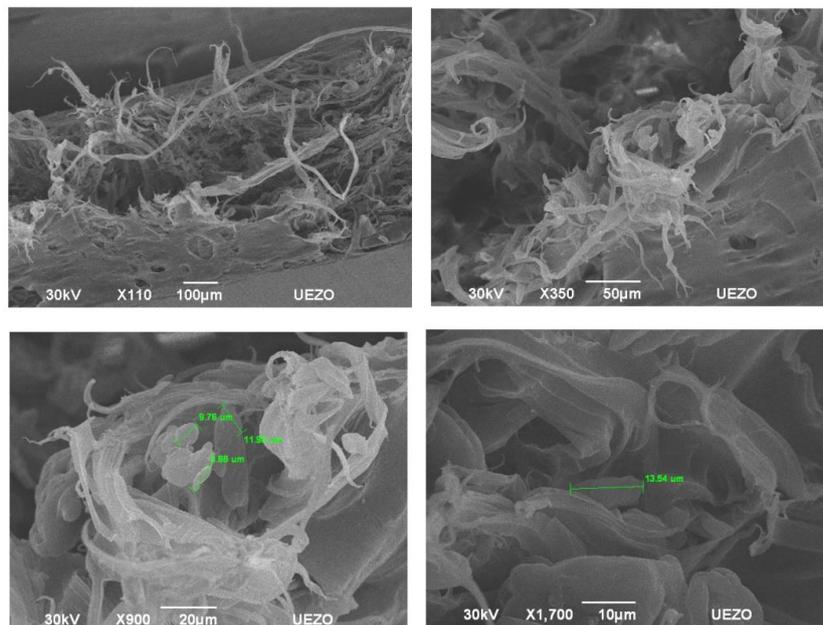


Figura 45. Micrografias de MEV da blenda de PEBDrec/PC-ABS (70/30%), na granulometria de 115 mesh.

A Técnica de EDS foi utilizada para detectar possíveis metais tóxicos presentes nos materiais obtidos. A Tabela 11 e 12 apresentam os elementos que foram detectados pela técnica de EDS.

Pode-se observar que a superfície da amostra apresenta metais como: carbono (C), oxigênio (O) e titânio (Ti), indicando a matriz polimérica constituída de carbono e oxigênio, provavelmente, por dióxido de titânio (TiO_2), que é um dos aditivos mais utilizados durante o

processamento das carcaças de aparelhos celulares, pois o mesmo protege o polímero da degradação por radiação ultravioleta. A presença de metais como cloro (Cl) e fósforo (P) pode ser associada à inserção de retardantes de chama halogenados e fosfatos que são adicionados às carcaças PC-ABS. Ainda é possível notar outros elementos como Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Zinco (Zn) que podem ser associados a outros aditivos como estabilizantes térmicos e fotoquímicos, antioxidantes e cargas. (RABELO, 2002; HIRAYAMA, 2015).

Tabela 11. Detecção dos elementos presentes nas amostras de PEBDrec, carcaças de PC-ABS e nas blendas de PEBDrec/PC-ABS, nas composições de 85/15% e 70/30%, nas diferentes granulometrias, pela técnica de EDS.

	C	Al	Si	Cl	K	Cu	Zn	O
PEBDrec	90,9	1,34	1,72	0,14	0,14	3,47	2,03	7,02
Carcaças/PC-ABS	84,63	4,79	1,26	0,58	1,63	*	*	5,81
85/15% - 42mesh	98,82	*	2,28	*	*	1,63	1,26	*
85/15% - 60mesh	99,29	*	*	*	*	0,88	0,37	*
85/15% - 115mesh	96,62	0,13	0,61	*	*	1,09	1,79	6,23
70/30% - 42mesh	93,77	0,17	0,18	0,2	*	2,88	2,38	1,78
70/30% - 60mesh	92,6	1,23	0,37	0,11	*	2,35	1,29	4,14
70/30% - 115mesh	99,47	0,11	*	*	*	1,23	*	*

Tabela 12. Detecção dos elementos presentes nas amostras de PEBDrec, carcaças de PC-ABS e nas blendas de PEBDrec/PC-ABS, nas composições de 85/15% e 70/30%, nas diferentes granulometrias, pela técnica de EDS.

	Mg	Fe	Na	P	Ca	Ti	S	Se
PEBDrec	0,14	6,69	*	*	*	*	*	*
Carcaças/PC-ABS	0,89	*	0,06	0,28	0,25	2,73	*	*
85/15% - 42mesh	*	*	*	*	*	1,46	*	*
85/15% - 60mesh	*	*	*	*	*	*	*	*
85/15% - 115mesh	*	*	*	*	0,06	0,32	*	*
70/30% - 42mesh	*	*	*	*	0,82	1,81	0,32	0,59
70/30% - 60mesh	*	1,67	*	*	0,26	0,36	*	*
70/30% - 115mesh	*	*	*	*	*	*	*	*

6.3.8. Propriedades Mecânicas

Neste item serão discutidos os resultados de resistência à tração, deformação na ruptura, módulo elástico e resistência ao impacto.

6.3.8.1 Resistência à Tração

A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos no ensaio de tração das amostras de PEBDrec e das blendas de PEBDrec/PC-ABS. Este tipo de ensaio fornece informações importantes quanto à resistência mecânica (módulo de elasticidade, tensão na ruptura, alongamento na ruptura) das amostras reprocessadas.

Tabela 13. Resultados do ensaio de tração do PEBDrec e das blendas de PEBDrec/PC-ABS, nas duas composições e diferentes granulometrias das carcaças de celulares.

Amostras		Tensão na ruptura \pm DP (MPa)	Deformação na ruptura \pm DP (%)	Módulo elástico \pm DP (MPa)
PEBDrec	-	7,075 \pm 2,20	364,4 \pm 46,17	215 \pm 58,39
PEBDrec/PC-ABS (85/15%)	(115 mesh)	4,183 \pm 1,97	132,5 \pm 110,8	289 \pm 65,12
	(60 mesh)	4,463 \pm 1,80	108,1 \pm 86,30	270 \pm 97,75
	(42 mesh)	2,688 \pm 1,42	71,64 \pm 43,74	237,5 \pm 89,70
PEBDrec/PC-ABS (70/30%)	(115 mesh)	1,229 \pm 0,22	22,51 \pm 30,80	218,7 \pm 68,72
	(60 mesh)	1,357 \pm 0,23	46,01 \pm 19,87	165,6 \pm 76,97
	(42 mesh)	1,291 \pm 0,61	55,53 \pm 3,175	219,1 \pm 90,11

Pedroso e Rosa (2005) fizeram um estudo com a obtenção de uma blenda de polietileno de baixa densidade reciclado e amido. O valor da resistência à tração na ruptura do polietileno reciclado utilizado neste estudo foi de 12,0 MPa. Também Atuanya et al. (2014) avaliaram as propriedades físico-mecânicas de compósitos de polietileno de baixa densidade reciclado e cinzas de vagem de feijão. Neste estudo trabalhou-se com polietileno reciclado o qual apresentou um valor de tensão na ruptura igual a 8,0 N/mm².

De acordo com os pesquisadores Pedroso & Rosa (2005) e Gabriel (2012) a diminuição dos valores de tensão na ruptura das blendas de PEBDrec/PC-ABS (Tabela 13) pode estar relacionado à influência de possível degradação da superfície de ambos os polímeros reprocessados, ou o PC-ABS pode estar se comportando como um material de enchimento e não como um reforço, sem interação entre os materiais da mistura, apesar da presença das partículas de PC-ABS contribuírem com o aumento da cristalinidade do PEBDrec. Essa contribuição na cristalinidade pode ter causado a diminuição dos valores de deformação na ruptura.

Em geral, o módulo está intimamente relacionado com os domínios rígidos do material. Para as blendas de PEBDrec/PC-ABS, tanto os teores de 15%, quanto os teores de 30% em peso, proporcionaram o aumento do módulo de Young (módulo elástico), provavelmente por causa da rigidez associada aos aglomerados de PC-ABS (PEDROSO & ROSA, 2005).

As Figuras 46 – 48 apresentam os valores de tensão na ruptura, deformação na ruptura e módulo elástico do PEBDrec e das blendas de PEBDrec/PC-ABS, nas composições de 85/15% e 70/30%, nas diferentes granulometrias de PC-ABS.

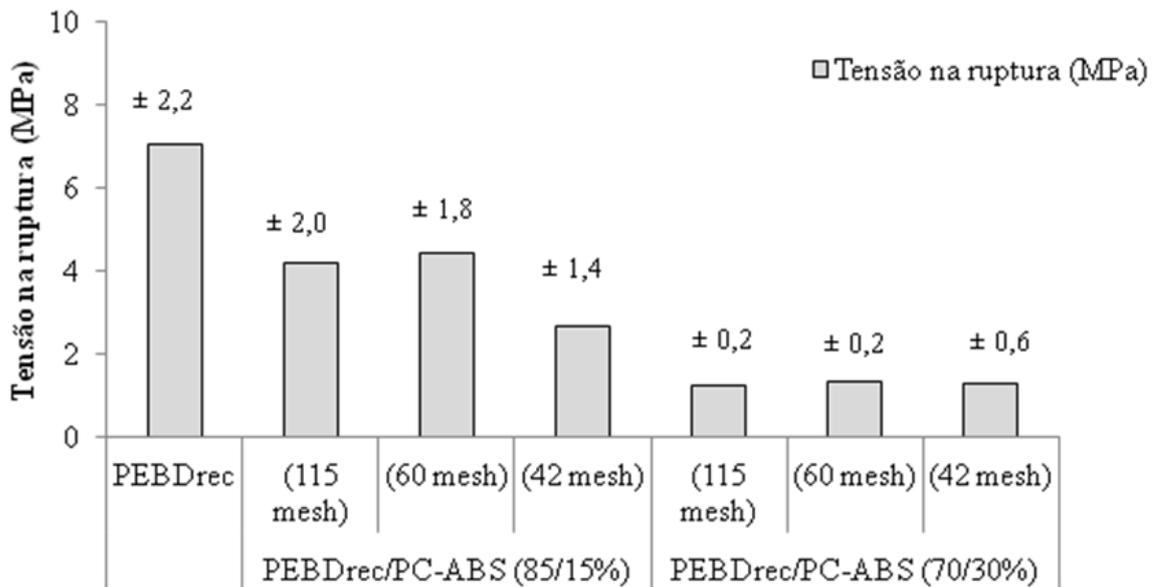


Figura 46. Tensão na ruptura do PEBDrec e das misturas de PEBDrec/PC-ABS, nas duas composições e diferentes granulometrias das carcaças de celulares.

Podem ser observados pela Figura 46 que a adição de PC-ABS diminuiu o valor de tensão na ruptura do PEBDrec. Esse resultado pode ser atribuído à fraca interação entre a fase contínua de PEBD reciclado e a fase dispersa de PC-ABS (material em menor composição na blenda), porém há a possibilidade de degradação na superfície dos materiais, principalmente da composição de butadieno no copolímero ABS.

O alongamento na ruptura pode romper mais rápido nas amostras mais envelhecidas, o que é o caso dos materiais reciclados. Também o baixo módulo de elasticidade pode ocorrer devido a imperfeições na superfície da amostra. Uma discreta diminuição dos resultados do ensaio de tração também pode ser explicada considerando que as propriedades mecânicas do ABS são influenciadas pela quantidade da fase de butadieno no copolímero.

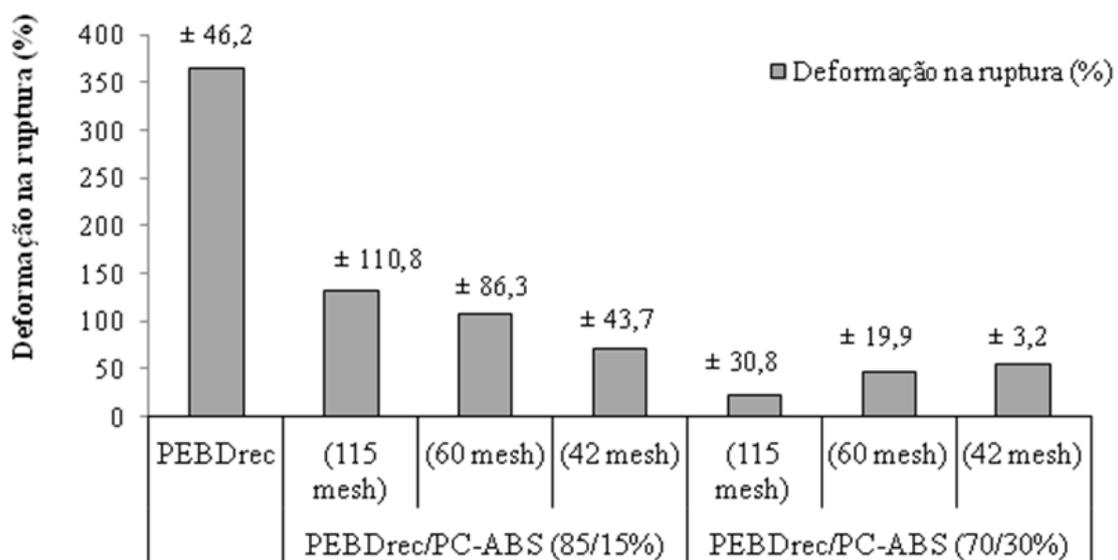


Figura 47. Alongamento na ruptura do PEBDrec e das misturas de PEBDrec/PC-ABS, nas duas composições e diferentes granulometrias das carcaças de celulares.

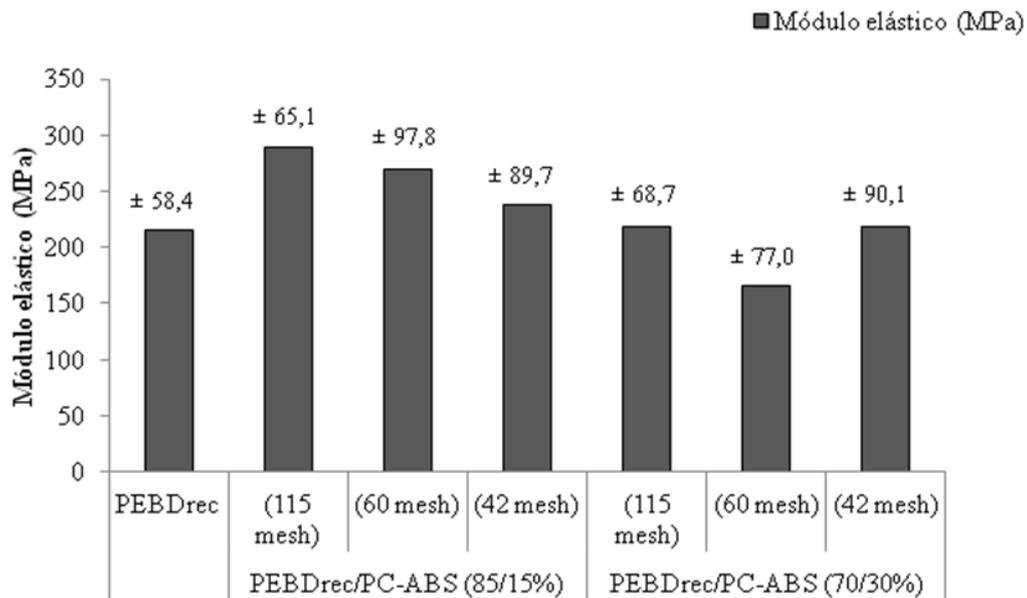


Figura 48. Módulo elástico do PEBDrec e das misturas de PEBDrec/PC-ABS, nas duas composições e diferentes granulometrias das carcaças de celulares.

6.3.8.2. Resistência ao Impacto

A Tabela 14 apresenta os valores de resistência ao impacto obtidos para o PEBDrec e as blendas de PEBDrec/PC-ABS nas composições de 85/15% e 70/30%, nas diferentes granulometrias.

Tabela 14. Resultados do ensaio de resistência ao impacto do PEBDrec e das blendas de PEBDrec/PC-ABS, nas composições de 85/15% e 70/30%, nas diferentes granulometrias das carcaças de celulares.

Material	Valores de Resistência ao Impacto (J/m)
PEBDrec	509,05
85/15 – 42 mesh	109,31
85/15 – 60 mesh	123,76
85/15 – 115 mesh	123,46
70/30 – 42 mesh	79,47
70/30 – 60 mesh	63,45
70/30 – 115 mesh	61,80

Os materiais poliméricos podem apresentar altos níveis de rigidez e resistência mecânica em paralelo à alta resistência ao impacto. O PEBD é um polímero versátil que exibe alta resistência ao impacto e sofre deformação, sem quebra (QUENTAL, SOARES, MANO, 1999; COUTINHO, MELLO, MARIA, 2003). Através da Tabela 14 é possível observar que as blendas de composição 85/15% apresentaram um pequeno acréscimo no valor de resistência ao impacto à medida que a granulometria das partículas de PC-ABS diminuiu. Este fato pode estar relacionado à maior dispersão das partículas de PC-ABS quando adicionadas ao PEBDrec, onde a fase elastomérica do ABS contribuiu para a melhor homogeneidade da mistura. Para as blendas de composição 70/30% ocorreu o

comportamento inverso, conforme a quantidade de PC-ABS aumentou, os valores de resistência ao impacto foram reduzidos. Esse comportamento foi atribuído ao aumento da quantidade de partículas na massa da blenda. A cristalinidade também pode ter influenciado na resistência ao impacto do material e possivelmente a pequena interação entre PEBDrec/PC-ABS não foi satisfatória (HILLIG et al, 2008)

A Figura 49 apresenta os resultados do ensaio de resistência ao impacto do PEBDrec e das blendas de PEBDrec/PC-ABS, nas composições de 85/15% e 70/30%, nas diferentes granulometrias das carcaças de celulares.

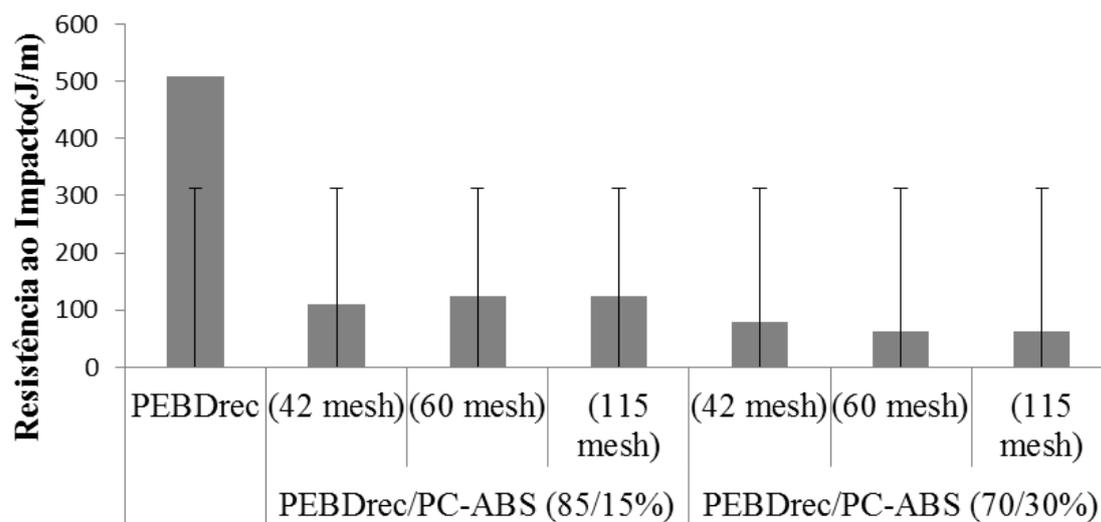


Figura 49. Ensaio de resistência ao impacto do PEBDrec e das blendas de PEBDrec/PC-ABS, nas composições de 85/15% e 70/30%, nas diferentes granulometrias das carcaças de celulares.

6.3.9 Caracterização das carcaças quanto à composição

6.3.9.1 Ensaio de lixiviação para determinação da periculosidade

A metodologia de lixiviação foi utilizada para determinar a capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo sólido, por meio de dissolução no meio extrator. Utilizou-se a norma NBR ABNT 10005 para classificar os resíduos sólidos em perigosos ou não perigosos para os extratos obtidos no ensaio de lixiviação (ABNT NBR 10005).

Na Tabela 15 são apresentados os percentuais dos materiais metálicos residuais que não foram digeridos por água régia

Tabela 15. Percentuais de materiais não-metálicos no PEBDrec, PC-ABS e nas blendas de PEBDrec/PC-ABS

	Material não metálico (%)
PEBDrec	58,7
Carcaças/PC-ABS	52,8
85/15% - 42mesh	53,1
85/15% - 60mesh	38,4
85/15% - 115mesh	62,5
70/30% - 42mesh	63,7
70/30% - 60mesh	64,6
70/30% - 115mesh	62,3

A Tabela 16 apresenta a concentrações dos metais presentes nos materiais PEBDrec, PC-ABS e blendas de PEBDrec/PC-ABS em mg/L

Tabela 16. Concentração dos metais presentes nos materiais PEBDrec, PC-ABS e blendas de PEBDrec/PC-ABS

Ensaio de periculosidade (concentração dos metais mg.L ⁻¹)							
	Cu	Fe	Ni	Cd	Pb	Zn	Al
PEBDrec	2,19	3,83	3,9	0,008	0,15	0,91	4
Carcaças/PC-ABS	45,36	97,8	51,7	0,006	0,59	22,33	96,29
85/15% - 42mesh	3,68	2,45	3,82	0,011	0,14	0,51	4,51
85/15% - 60mesh	0,56	1,05	1,74	0,01	0,09	0,43	4,5
85/15% - 115mesh	1,64	8,2	3,42	0,011	0,24	1,31	9,28
70/30% - 42mesh	1,86	7,81	5,41	0,011	0,22	1,47	18,39
70/30% - 60mesh	2,15	4,85	3,32	0,012	0,14	0,89	8,2
70/30% - 115mesh	11,58	13,14	4,89	0,011	0,21	1,72	11,32

A Norma ABNT 10004 apresenta os valores de limite máximo no extrato obtido no ensaio de lixiviação. No ensaio realizado com os materiais (PEBDrec e PC-ABS) e com as blendas de PEBDrec/PC-ABS, foi detectada a presença de dois dos metais tidos como parâmetro de periculosidade.

Com base nos dados obtidos e de acordo com a norma NBR 10004 foi possível constatar a presença dos metais Cádmio (Cd) e Chumbo (Pb) em quantidades muito pequenas nos extratos lixiviados (concentrações de Cádmio e Chumbo devem estar na faixa de 0,5 e 1,0 mg/L, respectivamente). Comparando os valores apresentados na Tabela 14 com os valores permitidos pela norma, verificou-se que os valores de Chumbo estão abaixo da concentração permitida pela norma e não foi detectada a presença de Cádmio. Estes valores indicam a não periculosidade dos materiais obtidos, podendo ser classificado como um resíduo não-perigoso (ABNT NBR 10004; DE JESUS, 2015).

As composições das blendas e a granulometria das partículas de PC-ABS não apresentaram uma relação direta na composição dos metais presentes nas blendas de PEBDrec/PC-ABS.

7. CONCLUSÕES

Ao término da análise dos resultados obtidos, foi possível chegar as seguintes conclusões:

- As curvas de torque, nas diferentes granulometrias da carcaça de aparelhos celulares e nas duas composições, apresentaram valores de torque mais elevados, que foram atribuídos a possíveis aditivos metálicos e minerais presentes nos materiais poliméricos;
- Não foi observada variações significativas nos espectros de FTIR nas diferentes composições, sendo um indicativo da forte influência do PEBDrec na mistura;
- A adição do polímero considerado amorfo de PC-ABS, em diferentes composições e granulometrias das partículas, promoveu um aumento na intensidade dos picos de cristalinidade do polietileno de baixa densidade reciclado e conseqüentemente, no grau de cristalinidade;
- A variação no grau de cristalinidade das blendas de PEBDrec/PC-ABS foi atribuída as impurezas e aos aditivos presentes no PEBDrec e no PC-ABS podem ter agido como agentes nucleantes de cristalização e interferido no grau de cristalinidade dos materiais poliméricos, devido a possível ocorrência de co-cristalização do PEBDrec com o PC-ABS;
- A presença de uma quantidade maior de carcaças de PC-ABS interferiu na estabilidade térmica dos materiais, contribuindo para a diminuição da resistência térmica dos materiais de PEBDrec/PC-ABS;
- Não houve variação significativa tanto nos valores de densidade quanto da absorção de água das blendas de PEBDrec/PC-ABS, aspectos que podem estar vinculados à cristalinidade da mistura.
- A dureza das blendas de PEBDrec/PC-ABS ficou bem abaixo do esperado. Esse comportamento foi atribuído à reciclagem secundária sofrida pelos polímeros, principalmente pelo PEBDrec, devido ao possível início de degradação térmica do material durante o processo de reciclagem;
- Considerando as análises das micrografias dos materiais, foi possível notar que a morfologia do PEBDrec foi modificada em paralelo ao aumento da proporção de PC-ABS nas blendas;
- A baixa cristalinidade do PEBDrec e provavelmente a pequena interação entre PEBDrec/PC-ABS, tornando-os menos rígidos, o que pode ter influenciado na resistência ao impacto;
- Os baixos resultados de tensão na ruptura do material PEBDrec/PC-ABS podem ser atribuídos a fraca interação entre a fase contínua de PEBD reciclado e a fase dispersa de PC-ABS;
- Foi possível comprovar que o material desenvolvido de PEBDrec/PC-ABS é passível de sofrer reciclagem, pois seu nível de periculosidade apresentou ser mínimo. Este aspecto é de suma importância, pois torna a reciclagem destes materiais viável, com chances de serem reinseridos no mercado sem maiores danos à saúde e ao meio ambiente.

9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros:

- Inserção de agente compatibilizante a fim de melhorar a interação entre o PEBDrec e as carcaças PC-ABS na mistura;
- Utilização de outros tipos de polímeros reciclados, principalmente a utilização de PEBD de reciclagem mecânica primária;
- Realizar um estudo comparativo com outros agentes lixiviantes;
- Processar os materiais em extrusora dupla-rosca, a fim de melhorar a homogeneidade da mistura.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPLAST. Perfil 2014. **Indústria brasileira de transformação de material plástico**. Disponível em: http://file.abiplast.org.br/download/links/2015/perfil_abiplast_2014_web.pdf Acesso em 02/6/2016 às 13h

ABIPLAST. Perfil 2012. **Indústria brasileira de transformação de material plástico**. Disponível em: http://file.abiplast.org.br/download/estatistica/perfil2012_versao_eletronica.pdf Acesso em 02/6/2016 às 14h

ABNT NBR10005 (Associação Brasileira de Normas Técnicas – Norma Brasileira). **Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro. 2004

ABNT NBR10004 (Associação Brasileira de Normas Técnicas – Norma Brasileira). **Resíduos Sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro. 2004.

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. 2013. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2013.pdf>. Acesso em 05/3/2015 às 8h.

ABILPLAST. **Perfil 2014**. Indústria brasileira de transformação de material plástico, ABIPLAST, disponível em: http://file.abiplast.org.br/download/links/2015/perfil_abiplast_2014_web.pdf

ABIPLAST. **Perfil 2012**. Indústria brasileira de transformação de material plástico, ABIPLAST, disponível em: http://file.abiplast.org.br/download/estatistica/perfil2012_versao_eletronica.pdf

Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial – ABDI. **Logística Reversa de Equipamentos Eletroeletrônicos Análise de Viabilidade Técnica e Econômica**. 2013. Disponível em < http://www.mdic.gov.br/arquivos/dwnl_1367253180.pdf > Acesso em 06/3/2015 às 18h

AHMED, M.; COTLER, J.; MULLIN, K. **Development of recycled plastic composites from consumer electronic appliances**. 2014 Disponível em <<http://soe.rutgers.edu/sites/default/files/imce/pdfs/gset2014/Developing%20Plastic%20Composites%20Final%20Paper.pdf> > Acesso em 18/6/2015 às 7h

AHMEDWIEBECK, H.; HARADA, **Plásticos de engenharia: Tecnologia e aplicações**. São Paulo: Artliber, 2005

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Water Absorption of Plastics. **ASTM D570 – 98 (2010)**

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness. **ASTM 2240-15**

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. **ASTM D638-14**

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics. **ASTM D256-10**

ANATEL. **Notícias: Brasil registra 281,70 milhões de linhas móveis em operação em janeiro de 2015**. 2015. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/Portal/exibirPortalNoticias.do?acao=carregaNoticia&codigo=36556>> Acesso em 13/3/2015 às 9h

ANDRADE, R. **Caracterização e classificação de placas de circuito impresso de computadores como resíduos sólidos**. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade de Campinas. Campinas, SP, 2002.

ATUANYA, C. U.; EDOKPIA, R. O.; AIGBODION, V. S. The physio-mechanical properties of recycled low density polyethylene (RLDPE)/bean pod ash particulate composites. **Results in Physics**, vol. 4, p. 88–95, 2014

BALART; R.; SANOGUERA, D. G.; LÓPEZ, J.; SALVADOR, M. D. Recycling of ABS and PC from electrical and electronic waste. Effect of miscibility and previous degradation on final performance of industrial blends. **European Polymer Journal**, vol. 41, p. 2150–2160, 2005.

BASSANI, T. S. **Reciclagem mecânica do resíduo industrial de polietileno reticulado**. 71 f. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia de Materiais, UFRGS, RS.

BASEL CONVENTION. **Guidance Document – Environmentally sound management (ems) of used & end-of-life mobile phones. mobile phone partnership initiative (MPPI)**. 2006. Disponível em: <<http://www.basel.int/industry/mppiwp/guidcomment/guidoc200406.pdf>> Acesso em 12/3/2015 às 22h

BAYER. Bayer Material Science AG, **Bayblend (PC+ABS; PC+ASA blend) product description**, Product Center, Abril. 2014. Disponível em <http://www.plastics.bayer.com/Products/Ba_yblend.aspx> Acesso em 18/6/2015 às 8h

BEIGBEDER; J.; J. F., BERGERET, A.; LOPEZ-CUESTA, J. M. Study of the physico-chemical properties of recycled polymers from waste electrical and electronic equipment (WEEE) sorted by high resolution near infrared devices. **Resources, Conservation and Recycling**, vol. 78, p. 105–114, 2013.

BROGNOLI, R. Dossiê Técnico - Desenvolvimento da Qualidade na Reciclagem de Plásticos. SENAI. Rio Grande do Sul, 2006.

CANEVAROLO, S. V. **Ciência dos polímeros**. Ed. ARTLIBER, 2006.

CANEVAROLO, S. V. **Técnicas de caracterização de polímeros**. Ed. ARTLIBER, 2003.

CARASCHI, J. C.; LEÃO, A. L. Avaliação das propriedades mecânicas dos plásticos reciclados provenientes de resíduos sólidos urbanos. **Acta Scientiarum Maringá**, vol. 24, n. 6, p. 1599-1602, 2002.

CARVALHO, C. **Reciclagem Primária de ABS: Propriedades Mecânicas, Térmicas e Reológicas**. 180 f. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado de Santa Catarina. UDESC. 2009.

COUTINHO, F. M. B.; MELLO, I. L.; MARIA, L. C. S. Polietileno: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, vol. 13, nº 1, p. 1-13, 2003.

CORREA, C. A.; FONSECA, C. N. P.; NEVES, S.; RAZZINO, C. A.; HAGE JR., E. Compósitos Termoplásticos com Madeira. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, vol. 13, nº 3, p. 154-165, 2003

CROWE, M.; ELSER, D.; GÖPFERT, B.; MERTINS, L.; MEYER, T.;SCHMID, M., SPILLNER, A. **Waste from electrical and electronic equipment (WEEE): quantities, dangerous substances and treatment methods. Europe Environment Agency.** 2003. Disponível em < http://scp.eionet.europa.eu/publications/wp2003_1/wp/WEEE_2003 > Acesso em 10/4/2016 às 16h.

CUI, J.; ZHANG, L. Metallurgical recovery of metals from electronic waste: a review. **Journal of Hazardous Materials** vol. 158, p. 228–256, 2008.

DA SILVA, B. D.; MARTINS, D. L.; DE OLIVEIRA, F .C. **Resíduos Eletroeletrônicos no Brasil.** 2007. Disponível em < http://lixoeletronico.org/system/files/lixoeletronico_02.pdf> Acesso em 09/3/2015 às 10h

DE ISLABÃO, G. I. **Blendas de Polietileno de Ultra Alto Peso Molar (PEUAPM) com Polietileno Linear de Média Densidade (PELMD) para Rotomoldagem.** 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2005

DE OLIVEIRA, C. R.; GERBASE, A. E. Reciclagem do lixo de informática: uma oportunidade para a química. **Quim. Nova**, vol. 35, no. 7, p. 1486-1492, 2012.

DE JESUS. T.A. **Caracterização de Placas de Circuito Impresso Oriundas de Telefones Celulares e Recuperação de Cobre.** 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 2015.

DOAK, K. W. Ethylene polymers. Em: Mark, H. M.; BIKALES, N. M.; OVERBERG, C. G.; MENGES, G. **Encyclopedia of Polymer Science and Engineering**, John-Wiley & Sons, New York , vol. 6, 1986.

EPA – Environmental Protection Agency. USA. **Electronics Waste Management in the United States Through 2009.** 2011. Disponível em: <<http://www.epa.gov/osw/conservation/materials/ecycling/docs/fullbaselinereport2011.pdf>> Acesso em 10/3/2015 às 9h

FELDMAN, D., A. BARBALATA. **Synthetic Polymers: Technology, Properties, Applications.** 1 ed. London. Chapman & Hall, 1996.

FERREIRA, F. C. M. **Comportamento sob abrasão em polietileno de ultra-alto peso molecular (UHMWPE) irradiado,** 137 f. Dissertação (Mestrado). Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro. 2007.

FRAGA, I. M. **Aproveitamento de carepa e E-cat no desenvolvimento de compósitos de polietileno reciclado e modificado com agentes oxidantes.** 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 2010

FRANCO, R. G. F. **Protocolo de referência para gestão de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos domésticos para o município de Belo Horizonte.** 162 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) Universidade Federal de Minas Gerais. 2008.

GABRIEL, A. P. **Caracterização e reciclagem da carcaça polimérica de monitores de tubos de raios catódicos pós-consumo**. 94 f. 2012. Dissertação de Mestrado em Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, RS.

GATNER. **Gartner says annual smartphone sales surpassed sales of feature phones for the first Time in 2013**. 2014. Disponível em: <<http://www.gartner.com/newsroom/id/2665715>> Acesso em 13/3/2015 às 8h.

GIOVANELLA, J.; JANCZKOWSKI, R.; SOARES, G.C.; SERAFIM, C.E.; RAMOS, T.O.B.; SILVA, C.W.DA.; MOLINARI, E.J.; CONTI, D.S. Reciclagem de materiais: estudo das propriedades mecânicas de policarbonato reciclado de discos compactos. **Revista Matéria**, vol. 13, n. 4, p. 643–649, 2008.

HIRAYAMA, D. **Reciclagem do copolímero acrilonitrila-butadieno-estireno e do poliestireno de alto impacto oriundos de rejeitos de equipamentos elétricos e eletrônicos na forma de blendas poliméricas**. 215 f. 2015. Tese de Doutorado em Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, USP, Lorena, SP.

INTERNATIONAL PRECIOUS METAL INSTITUTE - IPMI. **Guidance: ESM for Used Mobile Phones**, 2003. Disponível em: <<http://www.basel.int/industry/mppi/IPMIguidance.doc>>. Acesso em 14/4/2015 às 20h.

JEONA, K.S., CHAR, K., KIM, E. WALSH, D. J. Thermodynamics of mixing estimated by equation-of-state parameters in miscible blends of polystyrene and tetramethylbisphenol-A polycarbonate. **Polymer**, vol. 41, p. 2839–2845, 2002

KANG, H.Y; SCHOENUNG, J.M. Electronic waste recycling: A review of U.S. infrastructure and technology options. **Resources, Conservation and Recycling**, vol. 45, p. 368-400, 2005.

KASPER, A. C.; BERSELLI, G. B. T.; FREITAS, B. D.; BERNADES, A. M.; VEIT, H. M. Estudo da reciclagem das Blendas PC+ABS e PC+ABS+EPÓXI provenientes de sucatas eletrônicas. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, no. 16. p. 26-35, 2010.

KONG, Y.; HAY, J.N. Miscibility and crystallisation behaviour of poly(ethylene terephthalate)/polycarbonate blends.. **Polymer**, vol. 43, p. 1805-1811, 2002

KONING, C.; JEROME, R. MARTIN, V. D., CHRISTOPHE, P. Strategies for compatibilization of polymer blends. **Progress. Polymer Science**, vol.23, no. 4, p. 707-757, 1998.

LEGUENZA, E. L. **Influência do negro de carbono (carbon black) nas propriedades dielétricas do polietileno envelhecido sob radiação UV**. Curitiba, 1999. Dissertação (Mestrado em Física), Universidade Federal do Paraná.

LEE, C. K.; RHEE, K. I.; SOHN, H. J. Recovery of gold from electronic scrap by hydrometallurgical processes. **Chawon Risaikring**, vol. 6, no. 3, p. 36–40, 1997.

LEE, C., ROINE, K. **Extended producer responsibility stimulating technological changes and innovation: case study in the Norwegian electrical and electronic industry**. 2004. Disponível em: <http://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/242711/1/126157_FULLTEXT01.pdf> Acesso em 10/3/2015 às 11h

- LEE, C.; CHANG, C.; FAN, K.; CHANG, T. An overview of recycling and treatment of scrap computers. *Journal of Hazardous Materials, Elsevier*, vol. 114, p. 93-100, 2004.
- LUNA, C. B. B.; DA SILVA, D. F.; ARAÚJO, E. M. Estudo do comportamento mecânico e reológico de blendas de PS/SBRr e PS/SBRr/SBS. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, vol. 15, p. 66- 74, 2014
- LUNA, C. B. B.; DA SILVA, D. F.; BASÍLIO, S. K. T.; ARAÚJO E. M.; DA SILVA, A. L.; BEZERRA, A. F. C. Desenvolvimento de blendas poliméricas visando a tenacificação dos polímeros: Uma revisão. *Seminário de: Ciências Exatas e Tecnológicas*. Londrina, vol. 36, no. 1, p. 67-80, jan./jun, 2015
- MACHADO, R. **Lixo eletrônico cresce em quantidade preocupante no mundo**. 2014. Disponível em: <http://www.em.com.br/app/noticia/tecnologia/2014/01/28/interna_tecnologia,492342/lixo-eletronico-cresce-em-quantidade-preocupante-no-mundo.shtml> Acesso em 04/3/2015 às 15h.
- MANO, E. B.; MENDES L. C. **Introdução à Polímeros**. 2 ed. Edgard Blücher Ltda, Rio de Janeiro. 1999.
- MARAGKOS, K.G.; HAHLADAKIS, J.N.; GIDARAKOS, E. Qualitative and quantitative determination of heavy metals in waste cellular phones. *Waste Management*, vol. 33, p. 1882–1889, 2013.
- MARTINHO, G.; PIRES, A.; SARAIVA, L.; RIBEIRO, R. Composition of plastics from waste electrical and electronic equipment (WEEE) by direct sampling. *Waste Management*, vol. 32, p. 1213–1217, 2012.
- MARTINS, N.; ROCHA, T. L. A. C.; FIGUEIRÓ, M. F.; CÉSAR, P. G. B.; OCANHA, K.; MORAES; C. A. M. Caracterização de polímeros presentes em resíduos de equipamentos eletroeletrônicos: Estudo de caso com carcaças de telefones celulares. **6º Fórum Internacional de resíduos sólidos**. São Paulo. 2015.
- MATTAR, D.C.; VIANA, E. Utilização de resíduos poliméricos da indústria de reciclagem de plástico em blocos de concreto. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental* (e-ISSN: 2236-1170). vol. 8, n.º. 8, p. 1722-1733, 2012.
- MELO, P.R.S.; RIOS; E.C.D. ; GUTIERREZ, R.M.V. Placas de Circuito Impresso: Mercado Atual e Perspectivas. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, no. 14, p. 111 -136, set. 2001. Disponível em <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set1406.pdf>. Acesso em 08/4/2016.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Resoluções. 2015. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=257>> Acesso em 06/3/2015 às 15h
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). 2015. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/pol%C3%ADtica-de-res%C3%ADduos-s%C3%B3lidos>>. Acesso em 19/7/2015 às 18h
- MOLTÓ, J.; EGEEA, S.; CONESA, J.A.; FONT, R. Thermal decomposition of electronic wastes: Mobile phone case and other parts. *Waste Management*, vol. 31, p. 2546–2552, 2011

MOREIRA, D. G. G.; BUENO, F. M. S.; NASCENTE, P. A. P. **Caracterização da carcaça de aparelho celular**. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (CBECIMAT). Natal, Rio Grande do Norte. 2002.

MUCCILLO, R. C. S. T., **Caracterização e avaliação de amido nativo e modificado de pinhão mediante provas funcionais e térmicas**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.mund

MUNDO EDUCAÇÃO. Polímeros de Condensação. 2015. Disponível em: <<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/polimeros-condensacao.htm>> Acesso em 20/10/2015 às 14h.

ORAGWU, F.P.; IGWE, I.O. Studies on the Mechanical and Water uptake Properties o f Some Polyolefins / Corn Starch Blends. **American Journal of Engineering Research**, vol. 2, p. 22-27, 2013.

ORÉFICE, R. L., VASCONCELOS, W. L.; MORAES, M. A. S. Estabilidade de fases em blendas de policarbonatopoliestireno avaliada por micro-FTIR, Análise térmica e microscopia eletrônica de varredura. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, vol. 14, nº 2, p. 129-133, 2004.

PARLAMENTO EUROPEU. REEE. **Directiva 2002/96/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 27 de janeiro de 2003: Relativa aos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos**, 2003.

PASSADOR, F. R. FILHO, A. C. R.; PESSAN, L. A. Caracterização estrutural de nanocompósitos de blendas HDPE/LLDPE e OMMT obtidos por diferentes sequências de mistura. **Polímeros**, vol. 22, n. 4, p. 357-363, 2012

PEDROSO, A.G.; ROSA, D.S. Mechanical, thermal and morphological characterization of recycled LDPE/corn starch blends. **Carbohydrate Polymers**, vol. 59, p.1–9, 2005

PETTER, P. M. H. **Avaliação da eficiência da lixiviação de metais preciosos nas placas de circuito impresso com utilização de lixiviantes alternativos ao cianeto**. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2012.

PEREIRA, R. A.; MANO, E.B.; DIAS, M. L.; ACORDI, E. B. Comparative study on the lamellar crystal structure of high and low density polyethylenes. **Polymer Bulletin**, vol. 38, p.707-714, 1997.

PINHEIRO, E. L., MONTEIRO, M. A., DE ALMEIDA, R N., FRANCO, R. G. F., PORTUGAL, S. M. **Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos - PGIREEE**. 2009. Disponível em <http://www.feam.br/images/stories/minas_sem_lixoes/2010/eletroeletrnicos.pdf >Acesso em 05/3/2015 às 11h.

PLASTIVIDA. Instituto Sócio-Ambiental dos Plásticos. **Monitoramento dos índices de reciclagem mecânica de plásticos no Brasil**. 2013. São Paulo. Disponível em: <http://www.plastivida.org.br/2009/pdfs/IRmP/Apresentacao_IRMP_2012.pdf> Acesso em 16/3/2015 às 14h

QUENTAL, C. A.; HANAMOTO, L. S.; FELISBERTI, M. I. Caracterização de polietilenos lineares de baixa densidade. I. Determinação do teor de ramificação por métodos espectroscópicos. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, vol. 15, nº 4, p. 274-280, 2005

RABELO, M. **Aditivação de polímeros**. São Paulo: Art Liber, 2002.

RECICLA BRASIL. **Polietileno**. 2015. Disponível em : <http://reciclabrasil.net/ldpe.html>
Acesso em 14/6/2015 às 17h

REDIGHIERI, K. I. **Estudo de compósitos de partículas de madeira e PEBD reciclado na presença de agentes compatibilizantes**. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 2006

RODA, D.T. **Acrilonitrila-Butadieno-Estireno (ABS)**. 2015. Disponível em: <http://www.tudosobreplasticos.com/materiais/abs.asp> Acesso em 27/4/2015 às 11h

RODRIGUES, A.C. **Impactos socioambientais dos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos: estudo da cadeia pós-consumo no Brasil**. 321 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Metodista de Piracicaba. São Paulo, 2007.

SALMORIA, G. V.; AHRENS, C. H.; VILLAMIZAR, F. A. Y.; SABINO NETTO, A. C. Influência do desempenho térmico de moldes fabricados com compósito epóxi/alumínio nas propriedades de PP moldado por injeção. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, vol.18, n. 3, p. 262-269, 2008.

SANDER, M. M. **Estudo da ação plastificante de polímero obtido à partir de ácido oleico, em matriz de polipropileno e polietileno**. 2010. Trabalho de Conclusão do Curso de Química Industrial. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Pelotas, RS.

SANTANA, R. M. C.; MANRICH, S. Filmes tubulares de compósitos de termoplásticos pós-consumo: análise térmica e mecânica. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, vol. 15, nº 3, p. 163-170, 2005.

SANTOS, B. B. **Compósitos de polipropileno reciclado e pó de coco**. 51 f. 2012. Projeto de Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia de Materiais, UFRJ, RJ

SCAFFARO, R.; BOTTA, L.; DI BENEDETTO, G. Physical properties of virgin-recycled ABS blends - Effect of post-consumer content and of reprocessing cycles. **European Polymer Journal**, vol. 48, p. 637–648, 2012.

SILVA, M. C.; THIRÉ, R. M. S. M.; PITA, V. J. R. R.; CARVALHO, C.W.P.; ANDRADE, C. T. Processamento de amido de milho em câmara de mistura. **Revista Ciência e Tecnologia de Alimentos**, vol. 24, no. 2, p. 303-310, 2004.

SPINACÉ, M.A.S.; DE PAOLI, M.A. A tecnologia da reciclagem de polímeros. **Quim. Nova**, vol.28 nº.1, 2005

TARANTILI, P. A.; MITSAKAKI, A. N.; PETOUSSI, M. A. Processing and properties of engineering plastics recycled from waste electrical and electronic equipment (WEEE). **Polymer Degradation and Stability**, vol. 95, p. 405-410, 2010.

TORRES, A. A. U. **Envelhecimento físico químico de tubulações de polietileno de alta densidade empregadas em redes de distribuição de derivados de petróleo**. 180 f. Dissertação (Mestrado Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro . 2007

UTRACK; L. A.; WEISS, R. A. **Multiphase polymers blend and monomers**. Acs Symposium. p. 101, Cap 16. 1989

UGBAJA, M. I.; ONUOHA, F. N.; ONUGBU, EZEH, V. G. Mechanical properties of drilling mud waste- filled low density polyethylene composites. **Academic Research International**, vol. 4, no. 5 September, p. 178-186, 2013

Universidade de São Paulo - **USP**. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Policarbonato. 2015. Disponível em: <<http://www.usp.br/fau/deptecnologia/docs/bancovidros/polic.htm>> Acesso em 13/6/2015 às 16h

USPWIDMER, R.; OSWALD-KRAPF, H.; SINHA-KHETRIWALB, D.; SCHNELLMANN, M.; BÖNI, H. Global perspectives on e-waste. Environmental impact assessment. **Review Elsevier**, vol. 25, p. 436-458, 2005.

VALIM, F. C.; SILVEIRA, D. C.; COSTA, M. L. Estudo das propriedades morfológicas, térmicas e mecânicas do compósito particulado de alumínio e polietileno de baixa densidade reciclados. **Revista Matéria**, vol.20, n.4, p. 852 – 865. 2015.

VAZQUEZ, Y. V.; BARBOSA, S. E. Recycling of mixed plastic waste from electrical and electronic equipment. Added value by compatibilization. **Waste Management**, vol. 53, p. 196-203, 2016.

WANG, J.; YINGCHUN, L.; JIANGFENG, S.; MAOYONG, H.; SONG, J.; XIA, K. Recycling of acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) copolymers from waste electrical and electronic equipment (WEEE), through using an epoxy-based chain extender. **Polymer Degradation and Stability**, vol. 112, p. 167 e 174, 2015.

WASILKOSKI, C. M. **Caracterização do polietileno de baixa densidade através da técnica de análise dinâmico-mecânica e comparação com a análise por impedância dielétrica**. 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Paraná. 2002.

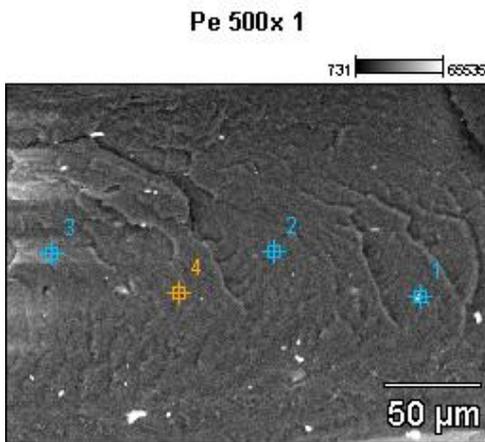
WIEBECK, H.; PIVA A. M.. **Reciclagem Mecânica: conceitos e técnicas**. 2015 Disponível em<http://www.institutodopvc.org/reciclagem/interf/pdf/reciclagem_mecanica.pdf>. Acesso em 17/6/2015 às 15h.

ZENI, A.M.; MACEDO, M.; FILHO, F. L. F.; HURTADO, A. L. B.; DE OLIVEIRA, I. L. **Tecnologias para o tratamento e reciclagem de resíduo eletrônico como práticas sustentáveis inovadoras**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção. 2012. Paraná. Disponível em <<http://www.aprepro.org.br/conbrepro/2012/anais/artigos/gestaoamb/1.pdf> > Acesso em 06/3/2015 às 17h

ANEXOS

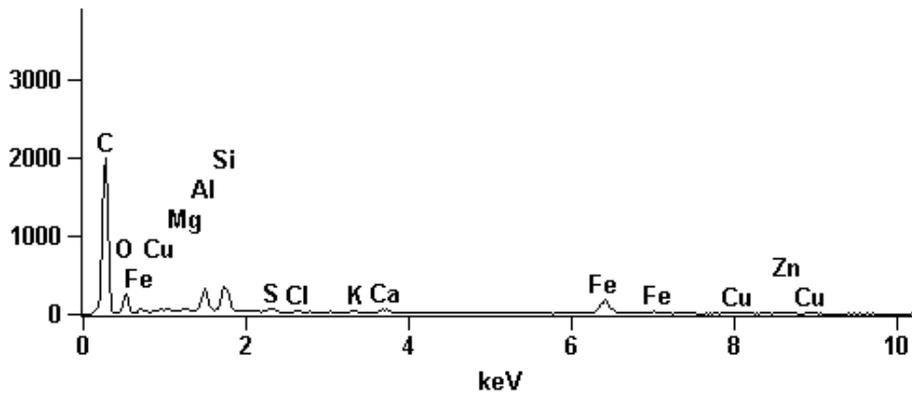
ANEXO 1 – Análise de EDS

- Análise correspondente ao PEBDrec



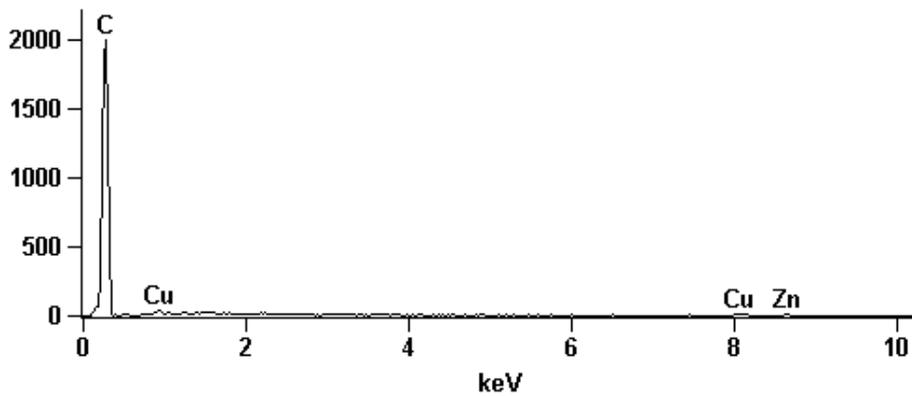
Full scale counts: 2000

Pe 500x 1_pt1



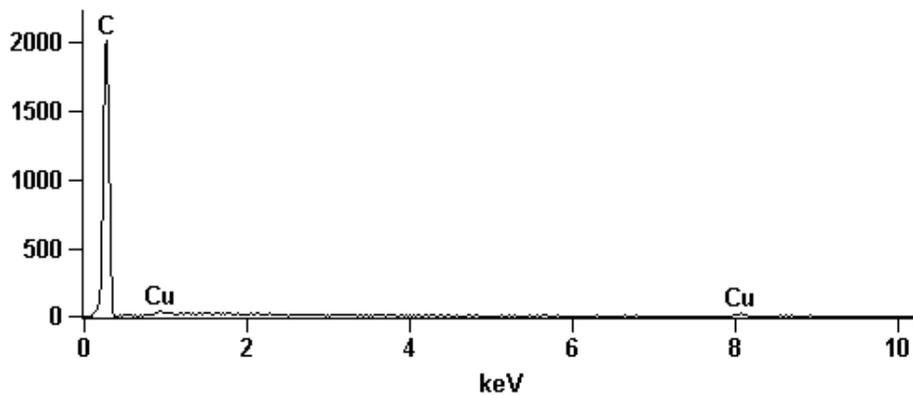
Full scale counts: 2000

Pe 500x 1_pt2



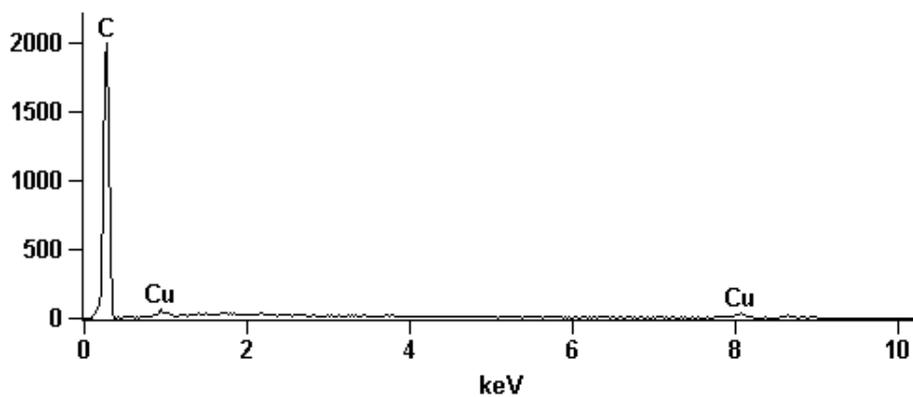
Full scale counts: 2001

Pe 500x 1_pt3



Full scale counts: 2000

Pe 500x 1_pt4



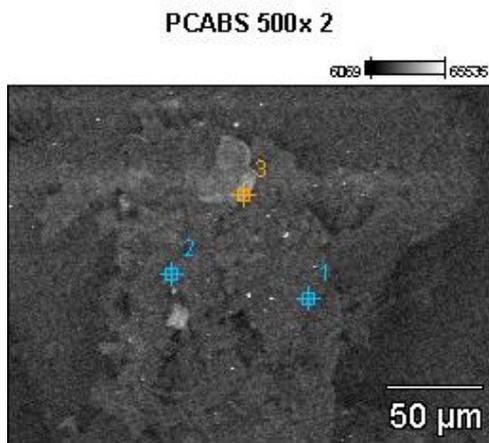
Weight %

	<i>C</i>	<i>O</i>	<i>Mg</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>S</i>	<i>Cl</i>	<i>K</i>	<i>Ca</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>
<i>Pe 500x</i>												
<i>1_pt1</i>	77.05	7.02	0.14	1.34	1.72	0.34	0.14	0.14	0.56	6.69	2.63	2.23
<i>Pe 500x</i>												
<i>1_pt2</i>	95.14										3.03	1.84
<i>Pe 500x</i>												
<i>1_pt3</i>	96.27										3.73	
<i>Pe 500x</i>												
<i>1_pt4</i>	95.10										4.90	

Atom %

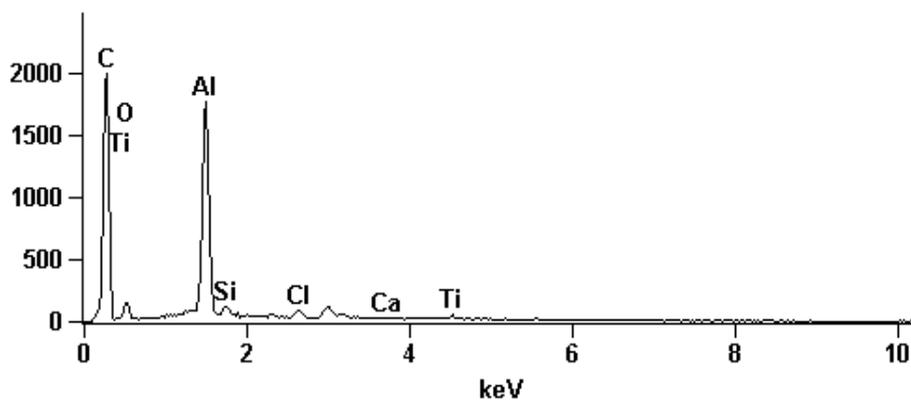
	<i>C</i>	<i>O</i>	<i>Mg</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>S</i>	<i>Cl</i>	<i>K</i>	<i>Ca</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>
<i>Pe 500x</i>												
<i>I_pt1</i>	89.12	6.09	0.08	0.69	0.85	0.15	0.05	0.05	0.20	1.66	0.57	0.47
<i>Pe 500x</i>												
<i>I_pt2</i>	99.05										0.60	0.35
<i>Pe 500x</i>												
<i>I_pt3</i>	99.27										0.73	
<i>Pe 500x</i>												
<i>I_pt4</i>	99.04										0.96	

- Análise correspondente à Carcaça de PC/ABS



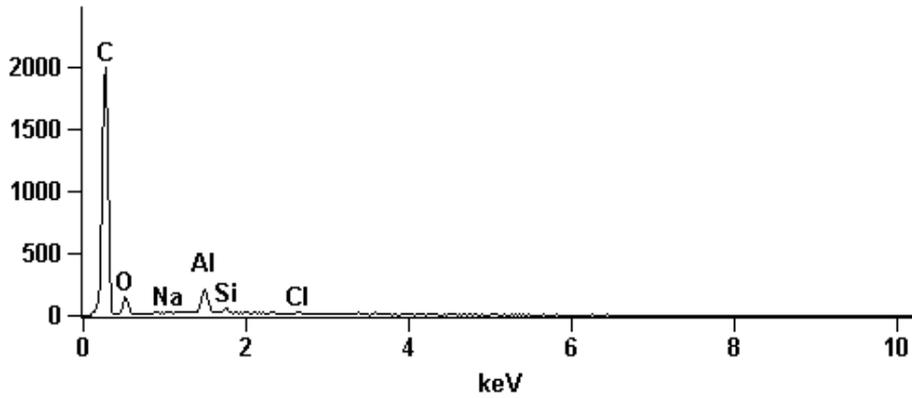
Full scale counts: 2000

PCABS 500x 2_pt1



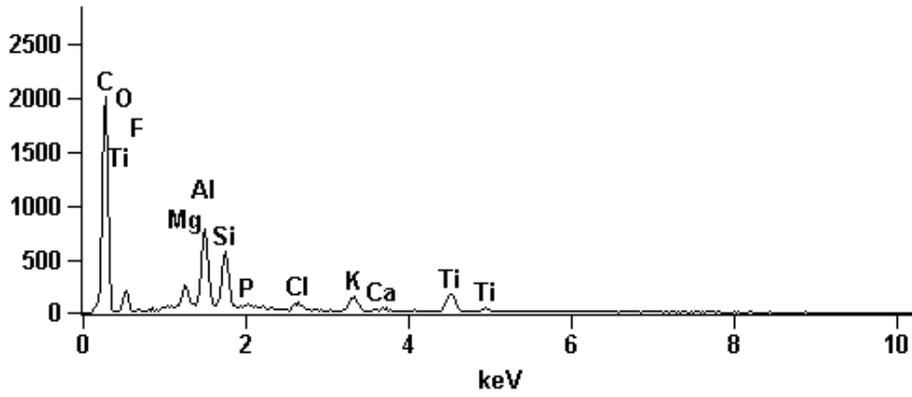
Full scale counts: 2000

PCABS 500x 2_pt2



Full scale counts: 2001

PCABS 500x 2_pt3



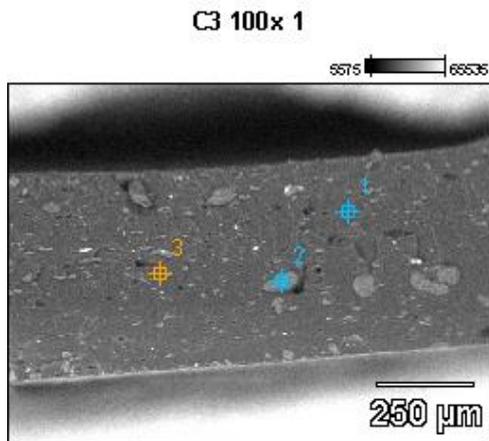
Weight %

	<i>C</i>	<i>O</i>	<i>F</i>	<i>Na</i>	<i>Mg</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>P</i>	<i>Cl</i>	<i>K</i>	<i>Ca</i>	<i>Ti</i>
PCABS 500x 2_pt1	83.60	4.93				8.84	0.53		0.88		0.16	1.06
PCABS 500x 2_pt2	91.59	5.90		0.06		1.82	0.45		0.19			
PCABS 500x 2_pt3	78.71	6.59	0.00		0.89	3.70	2.80	0.28	0.68	1.63	0.31	4.41

Atom %

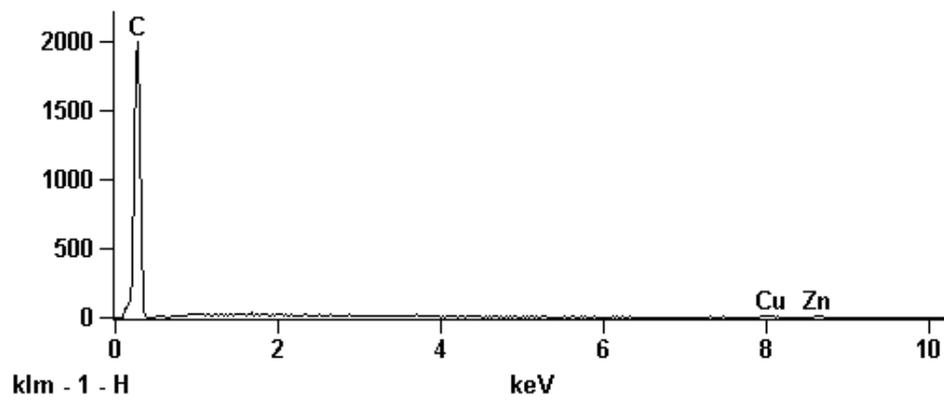
	<i>C</i>	<i>O</i>	<i>F</i>	<i>Na</i>	<i>Mg</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>P</i>	<i>Cl</i>	<i>K</i>	<i>Ca</i>	<i>Ti</i>
PCABS 500x 2_pt1	90.80	4.02				4.27	0.25		0.32		0.05	0.29
PCABS 500x 2_pt2	94.31	4.56		0.03		0.83	0.20		0.07			
PCABS 500x 2_pt3	88.46	5.56	0.00		0.49	1.85	1.35	0.12	0.26	0.56	0.11	1.24

- Análise correspondente à mistura 85% de PEBDrec + 15% de Carcaça de telefone celular com granulometria de 42 mesh



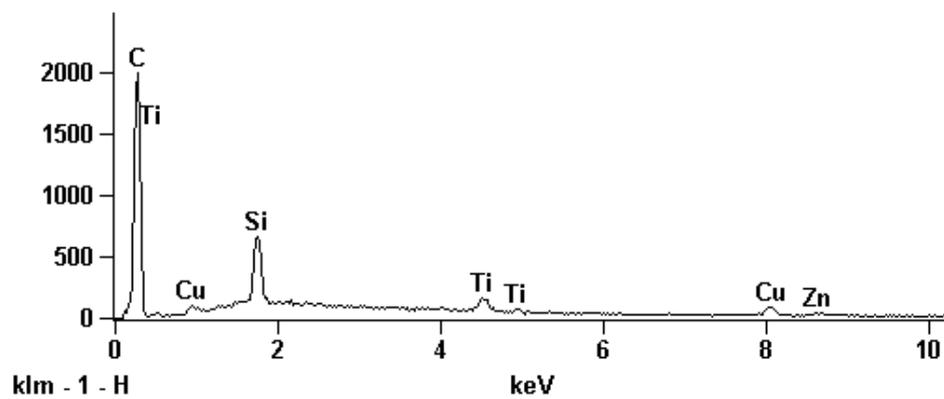
Full scale counts: 2000

C3 100x 1_pt1



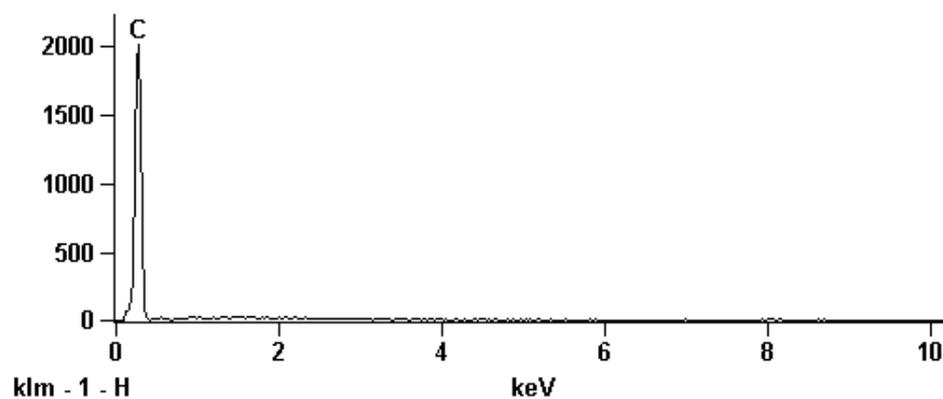
Full scale counts: 2000

C3 100x 1_pt2



Full scale counts: 2009

C3 100x 1_pt3



Weight %

	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Ti</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>
<i>C3 100x 1_pt1</i>	98.59			0.63	0.78
<i>C3 100x 1_pt2</i>	91.88	2.28	1.46	2.64	1.74
<i>C3 100x 1_pt3</i>	100.00				

Atom %

	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Ti</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>
<i>C3 100x 1_pt1</i>	99.73			0.12	0.14
<i>C3 100x 1_pt2</i>	97.70	1.04	0.39	0.53	0.34
<i>C3 100x 1_pt3</i>	100.00				

- Análise correspondente à mistura 85% de PEBDrec + 15% de Carcaça de telefone celular com granulometria de 60 mesh

C4 100x 1

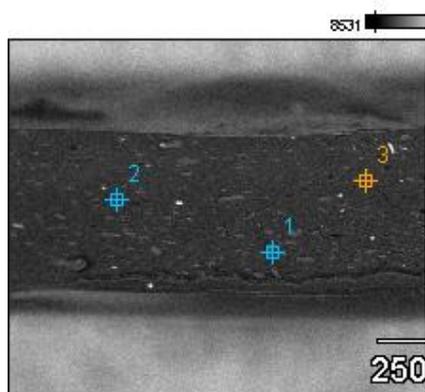
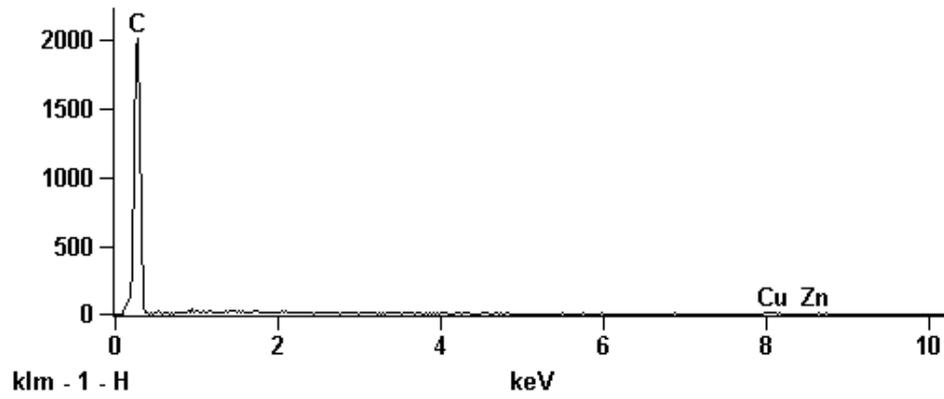


Image Name: C4 100x 1

Accelerating Voltage: 20.0 kV

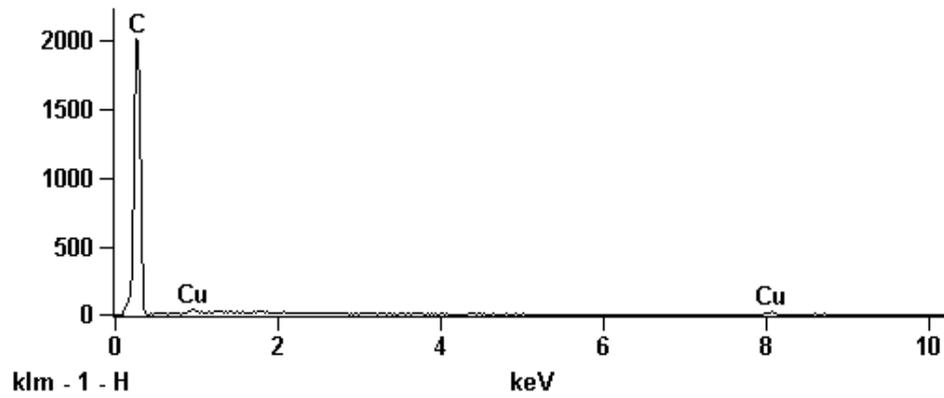
Full scale counts: 2003

C4 100x 1_pt1



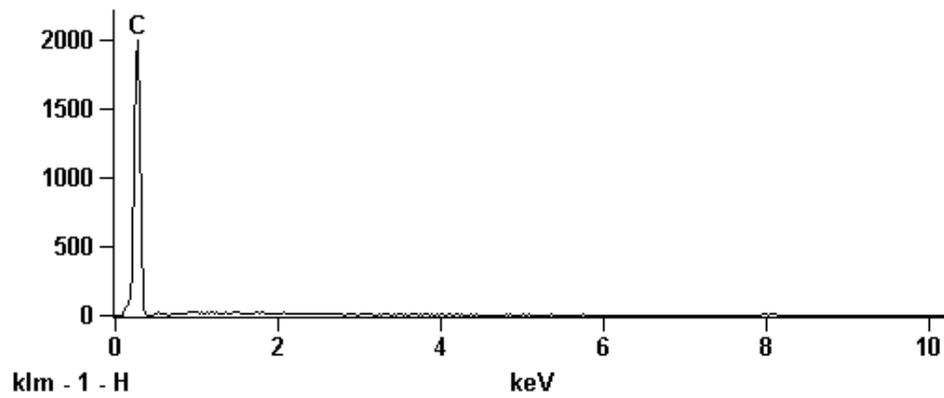
Full scale counts: 2002

C4 100x 1_pt2



Full scale counts: 2000

C4 100x 1_pt3



Weight %

	<i>C</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>
<i>C4 100x 1_pt1</i>	98.79	0.84	0.37
<i>C4 100x 1_pt2</i>	99.08	0.92	
<i>C4 100x 1_pt3</i>	100.00		

Atom %

	<i>C</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>
<i>C4 100x 1_pt1</i>	99.77	0.16	0.07
<i>C4 100x 1_pt2</i>	99.82	0.18	
<i>C4 100x 1_pt3</i>	100.00		

- Análise correspondente à mistura 85% de PEBDrec + 15% de Carcaça de telefone celular com granulometria de 115 mesh

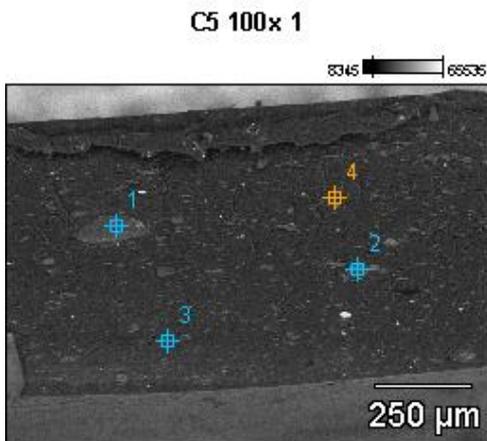
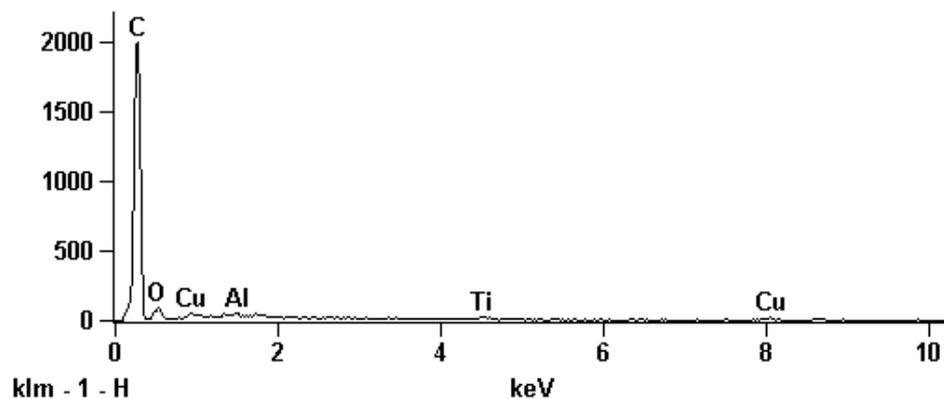


Image Name: C5 100x 1

Accelerating Voltage: 20.0 kV

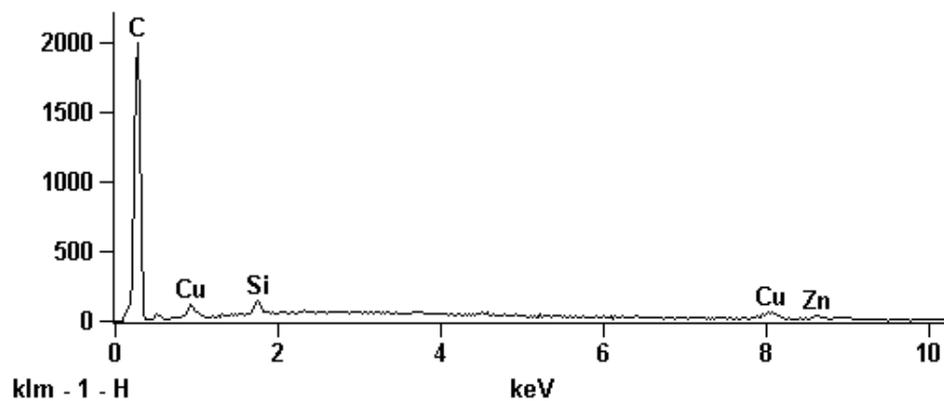
Full scale counts: 2000

C5 100x 1_pt1



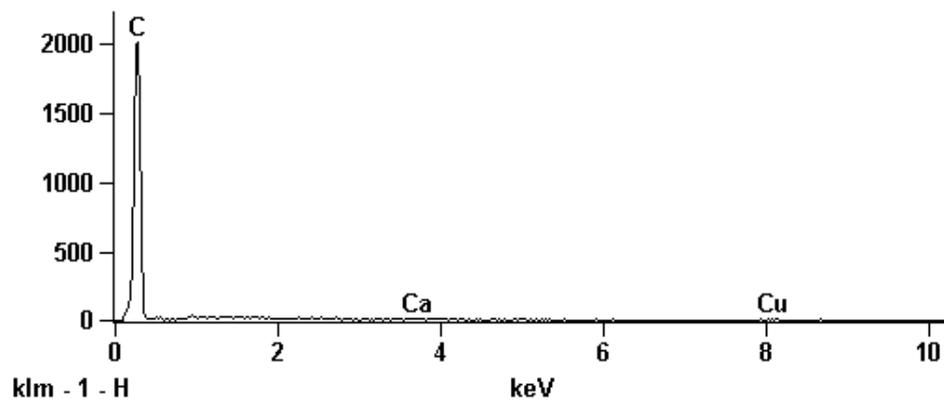
Full scale counts: 2000

C5 100x 1_pt2



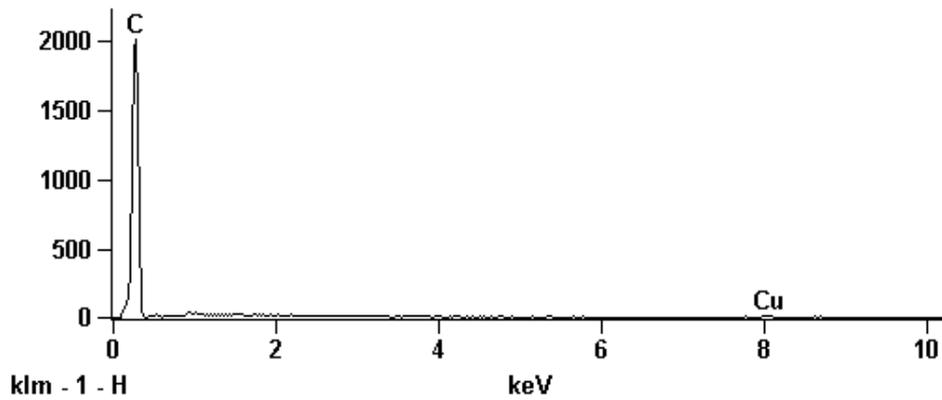
Full scale counts: 2001

C5 100x 1_pt3



Full scale counts: 2001

C5 100x 1_pt4



Weight %

	<i>C</i>	<i>O</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>Ca</i>	<i>Ti</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>
<i>C5 100x 1_pt1</i>	92.49	6.23	0.13			0.32	0.83	
<i>C5 100x 1_pt2</i>	95.18			0.61			2.42	1.79
<i>C5 100x 1_pt3</i>	99.56				0.06		0.38	
<i>C5 100x 1_pt4</i>	99.26						0.74	

Atom %

	<i>C</i>	<i>O</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>Ca</i>	<i>Ti</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>
<i>C5 100x 1_pt1</i>	94.90	4.80	0.06			0.08	0.16	
<i>C5 100x 1_pt2</i>	98.91			0.27			0.48	0.34
<i>C5 100x 1_pt3</i>	99.91				0.02		0.07	
<i>C5 100x 1_pt4</i>	99.86						0.14	

- Análise correspondente à mistura 70% de PEBDrec + 30% de Carcaça de telefone celular com granulometria de 42 mesh

C6 100x 1

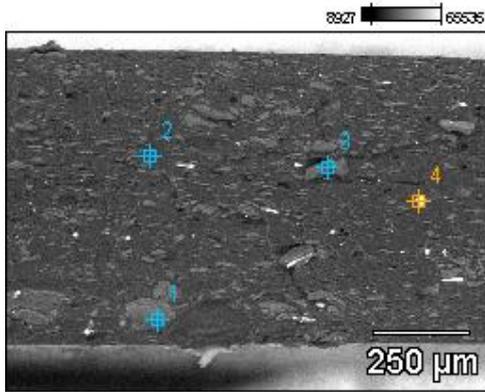
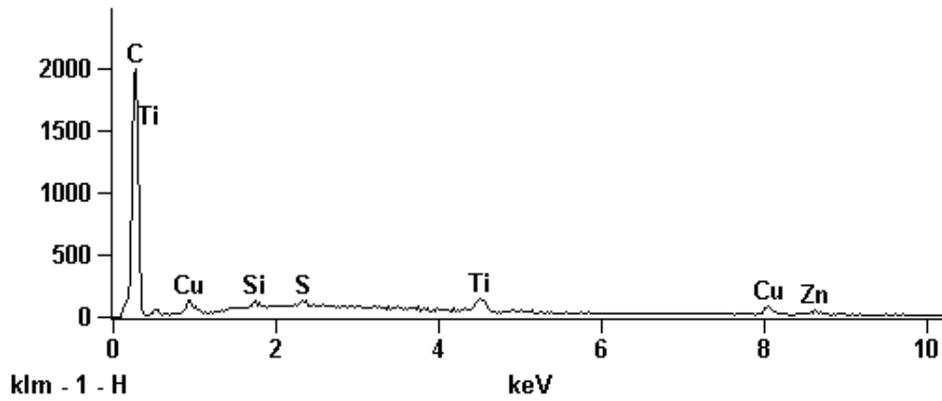


Image Name: C6 100x 1

Accelerating Voltage: 20.0 kV

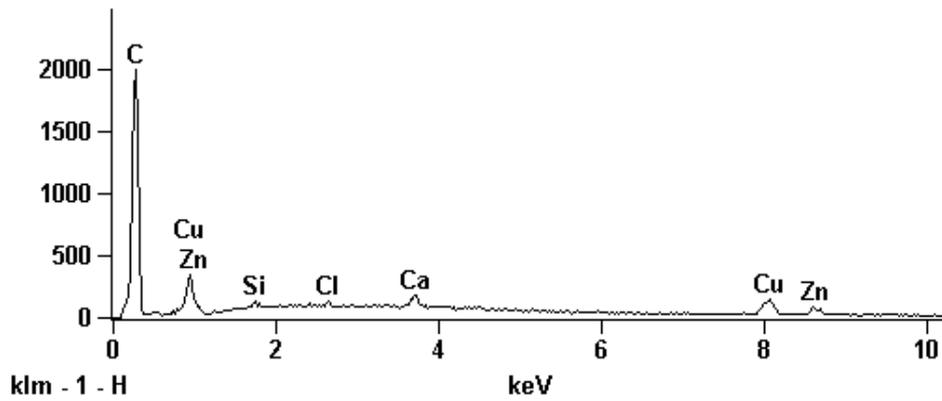
Full scale counts: 2000

C6 100x 1_pt1



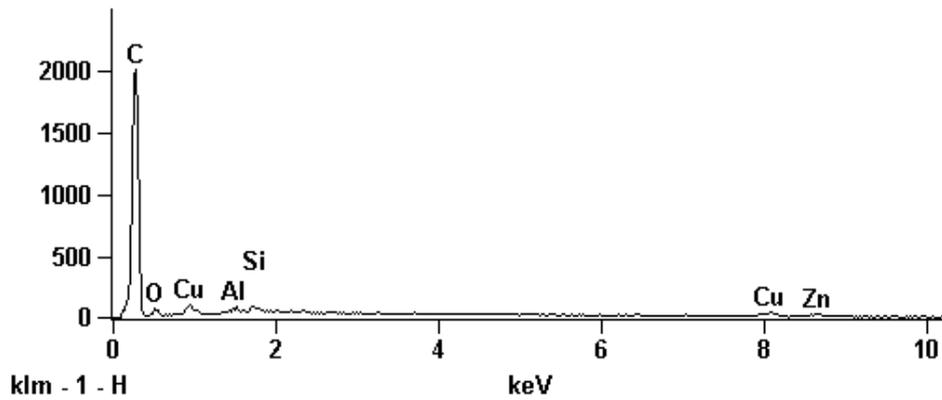
Full scale counts: 2000

C6 100x 1_pt2



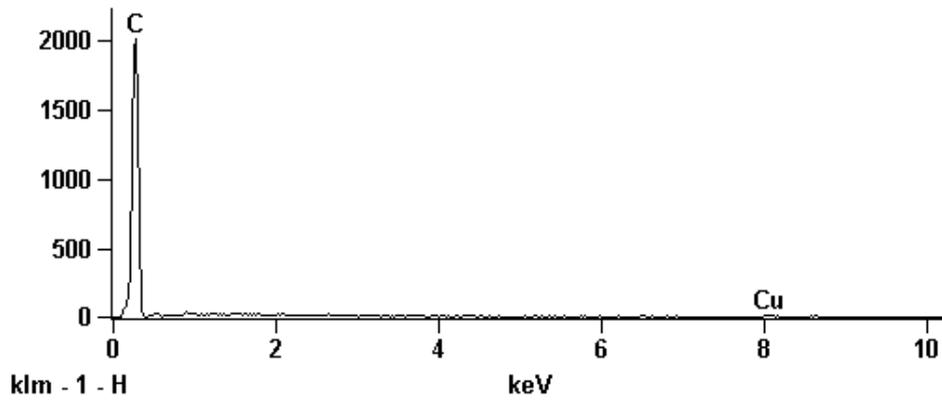
Full scale counts: 2001

C6 100x 1_pt3



Full scale counts: 2002

C6 100x 1_pt4



Weight %

	<i>C</i>	<i>O</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>S</i>	<i>Cl</i>	<i>Ca</i>	<i>Ti</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>Se</i>
<i>C6 100x</i>											
<i>1_pt1</i>	92.33			0.20	0.32			1.81	2.78	2.55	
<i>C6 100x</i>											
<i>1_pt2</i>	89.81			0.17		0.20	0.82		5.53	3.47	
<i>C6 100x</i>											
<i>1_pt3</i>	93.80	1.78	0.17	0.16					2.38	1.12	0.59
<i>C6 100x</i>											
<i>1_pt4</i>	99.17								0.83		

Atom %

	<i>C</i>	<i>O</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>S</i>	<i>Cl</i>	<i>Ca</i>	<i>Ti</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>Se</i>
<i>C6 100x</i>											
<i>1_pt1</i>	98.24			0.09	0.13			0.48	0.56	0.50	
<i>C6 100x</i>											
<i>1_pt2</i>	97.75			0.08		0.07	0.27		1.14	0.69	
<i>C6 100x</i>											
<i>1_pt3</i>	97.68	1.39	0.08	0.07					0.47	0.21	0.09
<i>C6 100x</i>											
<i>1_pt4</i>	99.84								0.16		

- Análise correspondente à mistura 70% de PEBDrec + 30% de Carcaça de telefone celular com granulometria de 60 mesh

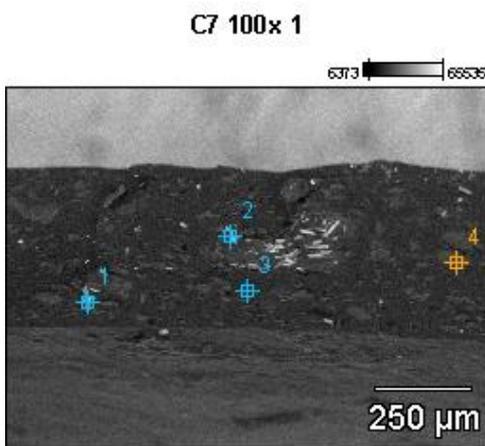
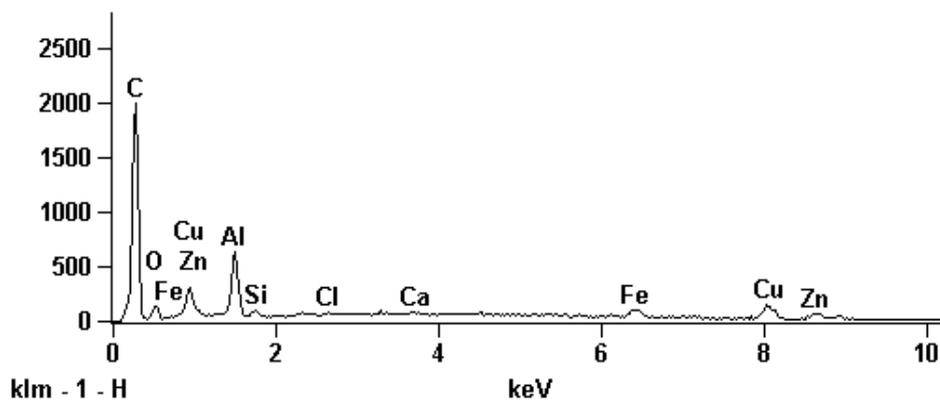


Image Name: C7 100x 1

Accelerating Voltage: 20.0 kV

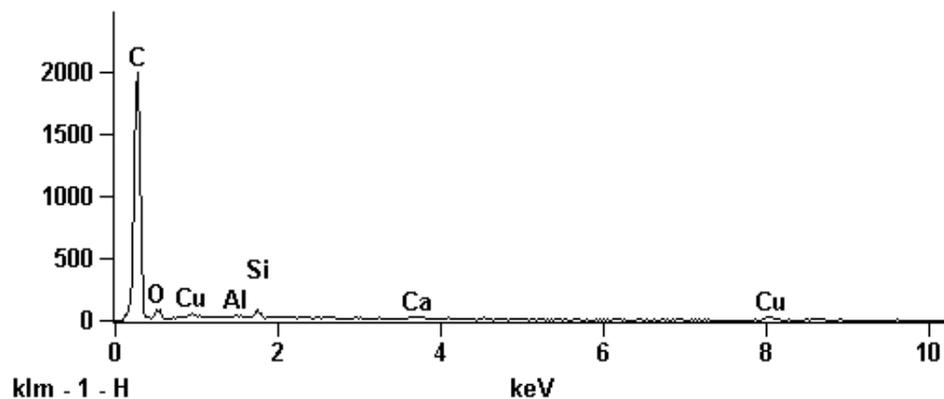
Full scale counts: 2000

C7 100x 1_pt1



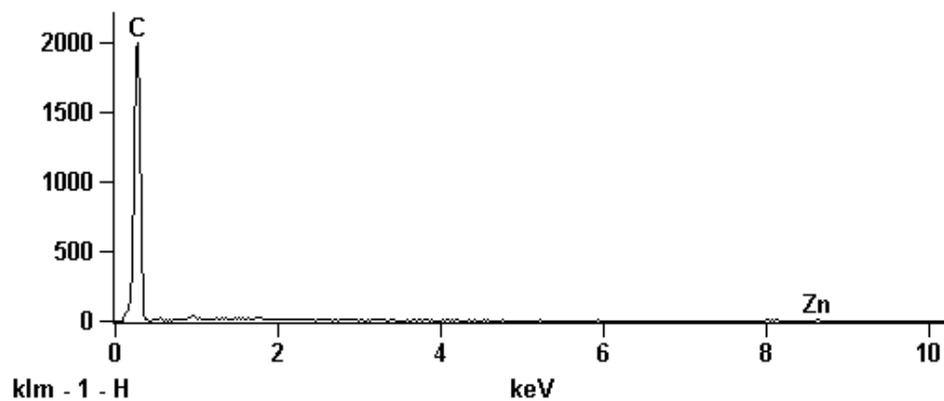
Full scale counts: 2000

C7 100x 1_pt2



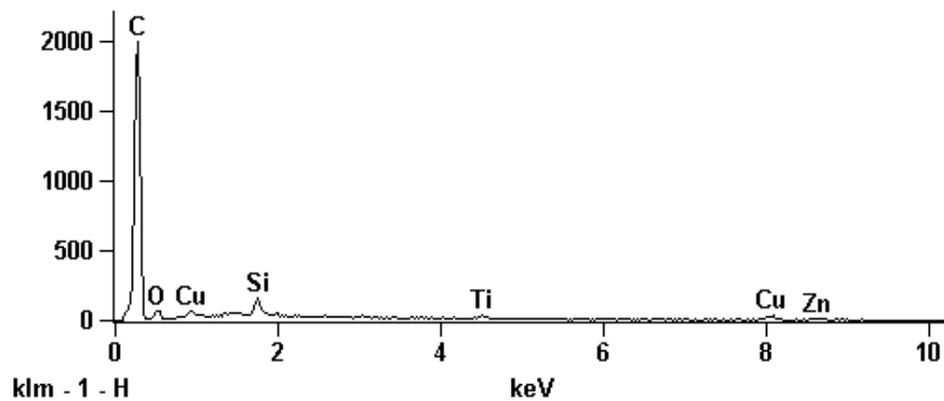
Full scale counts: 2000

C7 100x 1_pt3



Full scale counts: 2000

C7 100x 1_pt4



Weight %

	<i>C</i>	<i>O</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>Cl</i>	<i>Ca</i>	<i>Ti</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>
<i>C7 100x 1_pt1</i>	84.33	4.57	2.35	0.27	0.11	0.22		1.67	4.00	2.48
<i>C7 100x 1_pt2</i>	92.86	5.05	0.12	0.27		0.30			1.40	
<i>C7 100x 1_pt3</i>	99.55									0.45
<i>C7 100x 1_pt4</i>	93.67	2.80		0.57			0.36		1.65	0.95

Atom %

	<i>C</i>	<i>O</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>Cl</i>	<i>Ca</i>	<i>Ti</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>
<i>C7 100x 1_pt1</i>	93.08	3.79	1.15	0.13	0.04	0.07		0.40	0.84	0.50
<i>C7 100x 1_pt2</i>	95.56	3.90	0.05	0.12		0.09			0.27	
<i>C7 100x 1_pt3</i>	99.92									0.08
<i>C7 100x 1_pt4</i>	96.97	2.18		0.25			0.09		0.32	0.18

- Análise correspondente à mistura 70% de PEBDrec + 30% de Carcaça de telefone celular com granulometria de 115 mesh

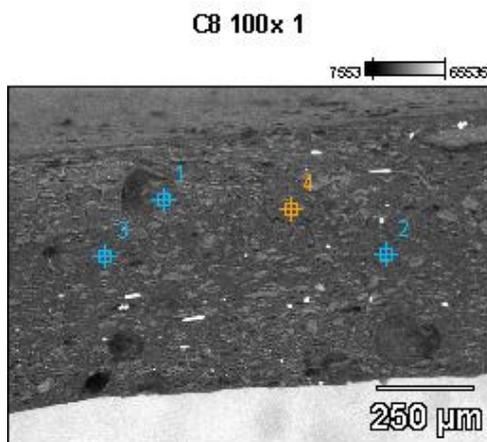
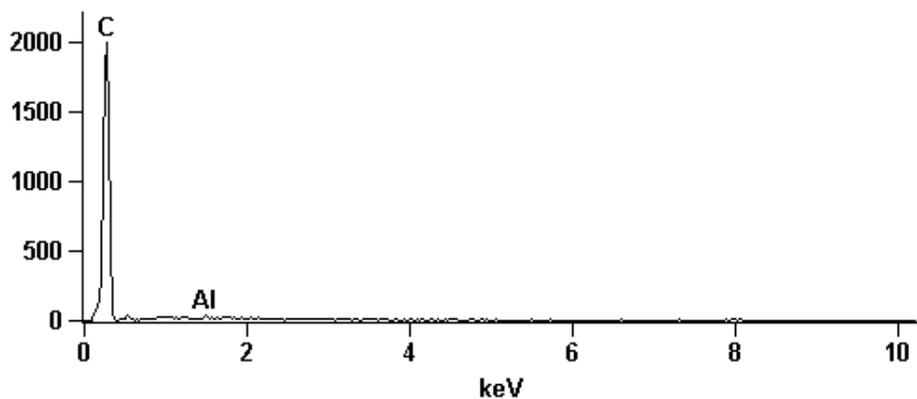


Image Name: C8 100x 1

Accelerating Voltage: 20.0 kV

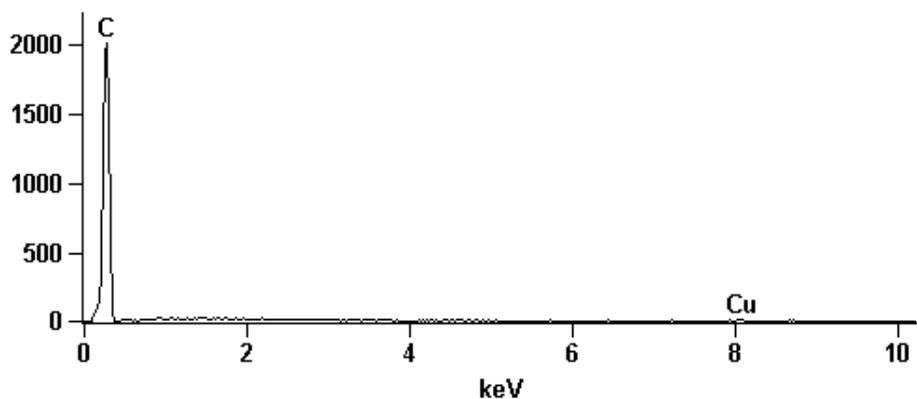
Full scale counts: 2000

C8 100x 1_pt1



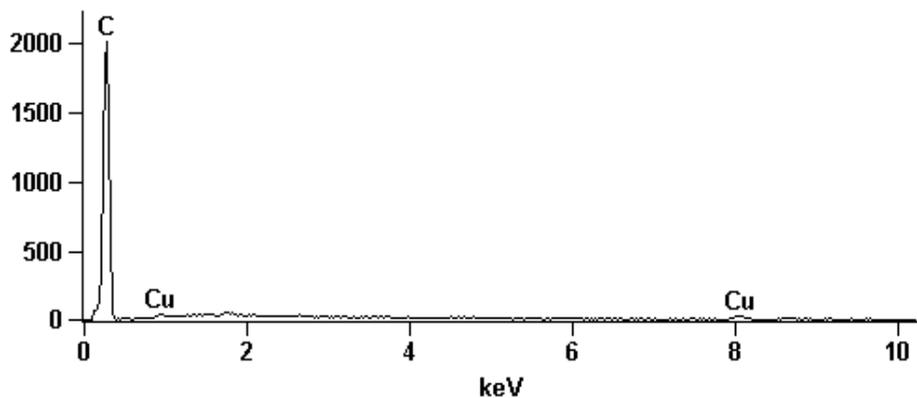
Full scale counts: 2001

C8 100x 1_pt2



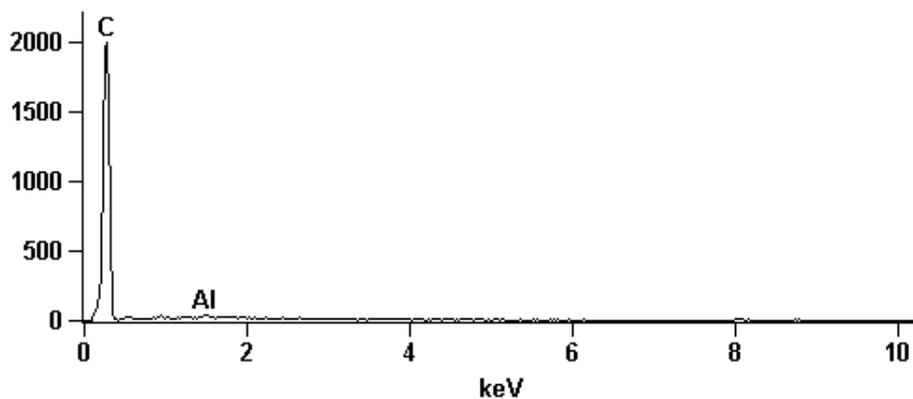
Full scale counts: 2001

C8 100x 1_pt3



Full scale counts: 2000

C8 100x 1_pt4



Weight %

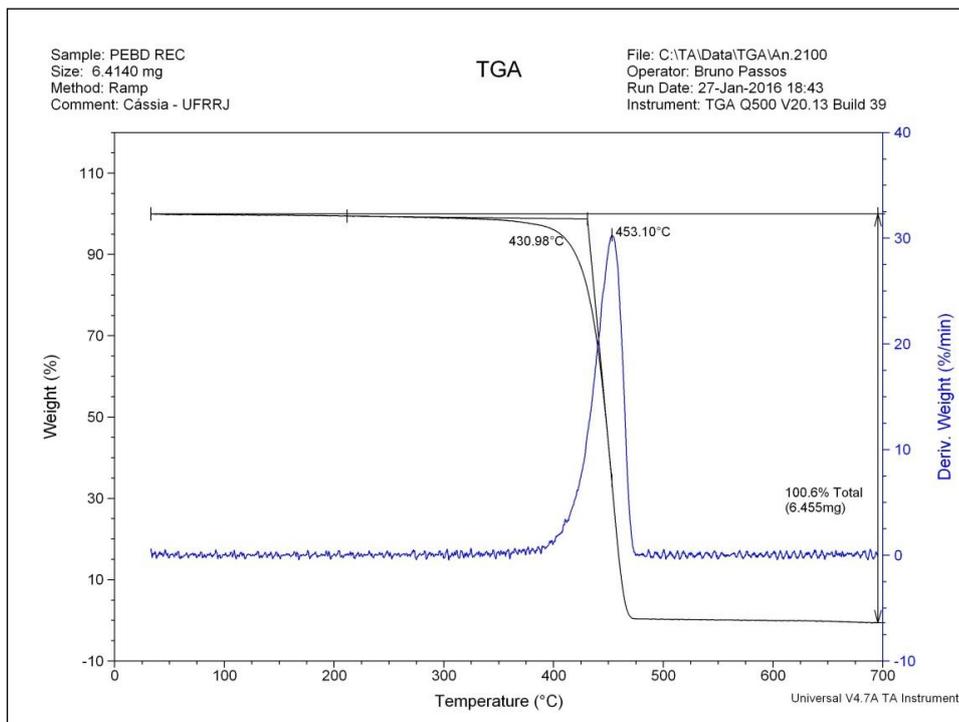
	<i>C</i>	<i>Al</i>	<i>Cu</i>
<i>C8 100x 1_pt1</i>	99.89	0.11	
<i>C8 100x 1_pt2</i>	99.55		0.45
<i>C8 100x 1_pt3</i>	98.58		1.42
<i>C8 100x 1_pt4</i>	99.88	0.12	

Atom %

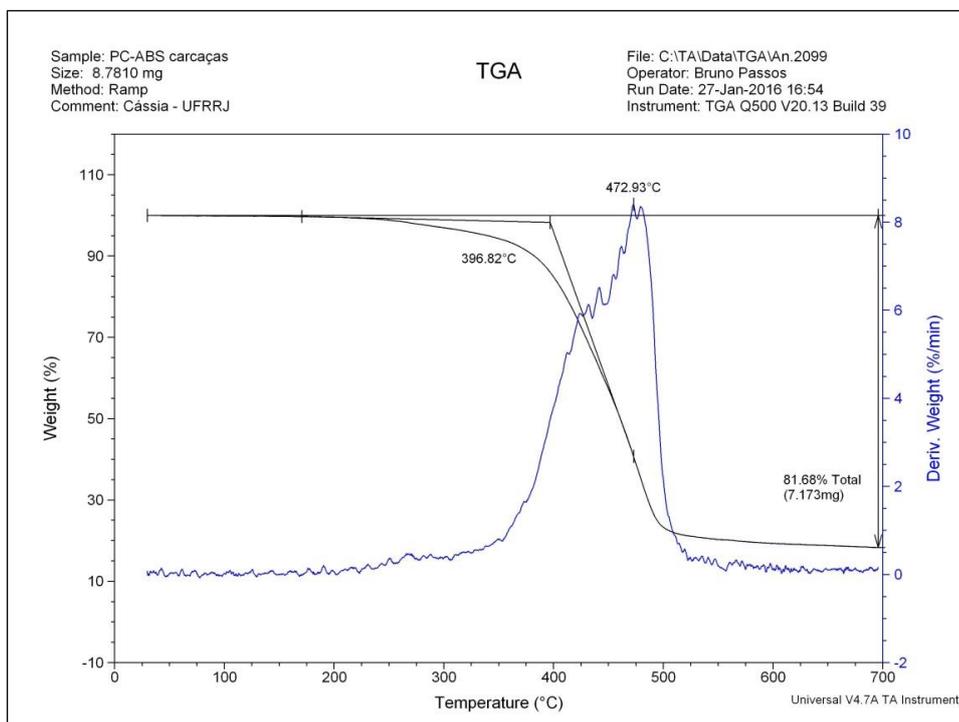
	<i>C</i>	<i>Al</i>	<i>Cu</i>
<i>C8 100x 1_pt1</i>	99.95	0.05	
<i>C8 100x 1_pt2</i>	99.92		0.08
<i>C8 100x 1_pt3</i>	99.73		0.27
<i>C8 100x 1_pt4</i>	99.95	0.05	

ANEXO 2 – Análise de TGA

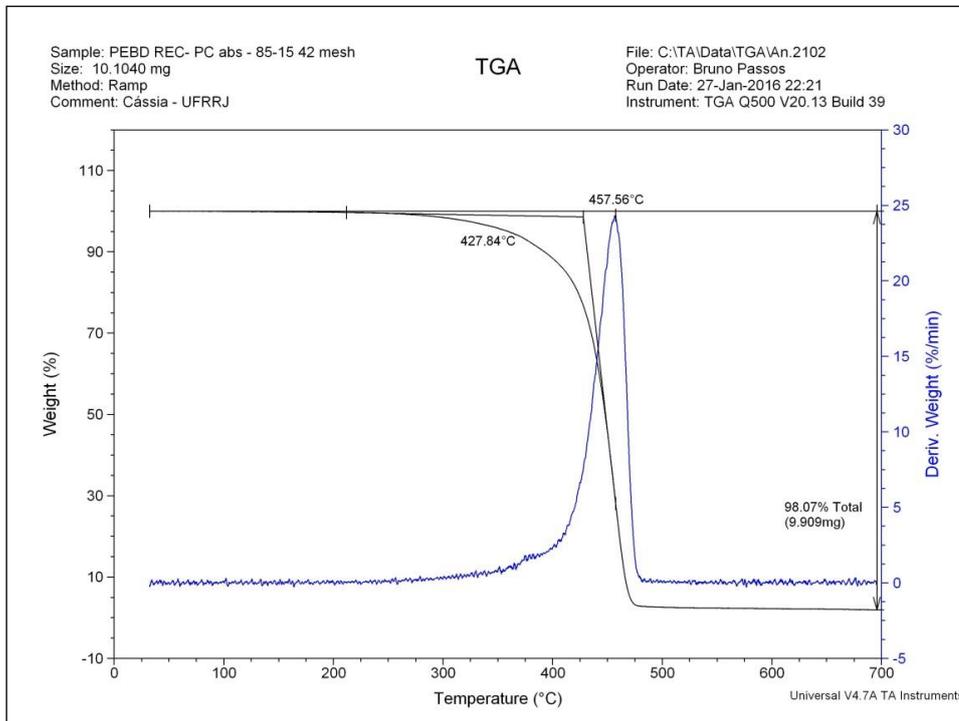
- Amostra corresponde ao PEBDrec puro



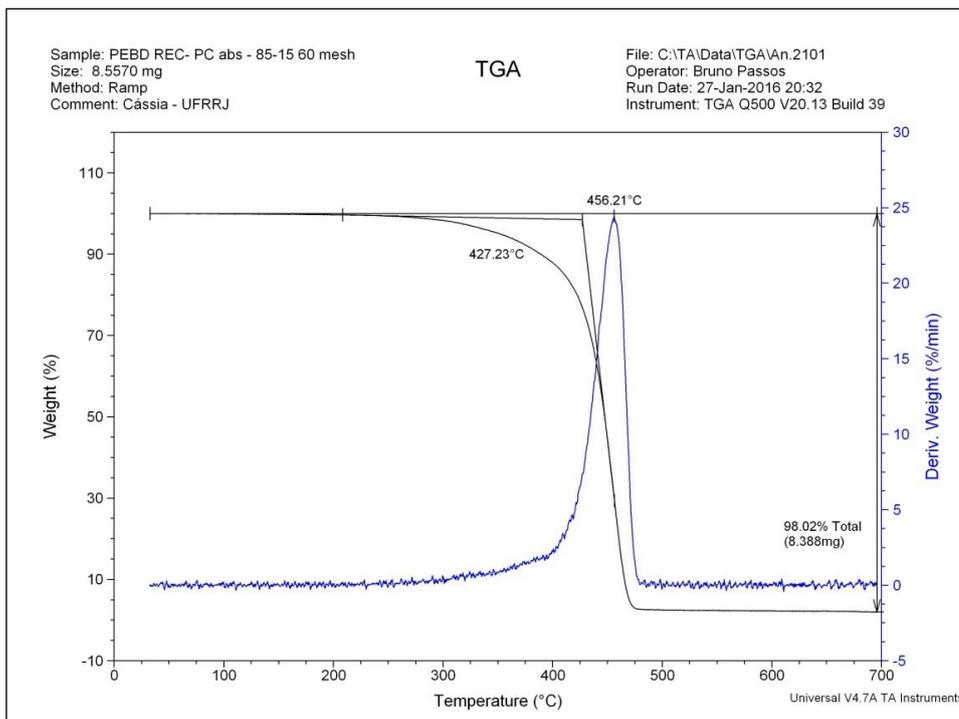
- Amostra corresponde à Carcaça de PC/ABS



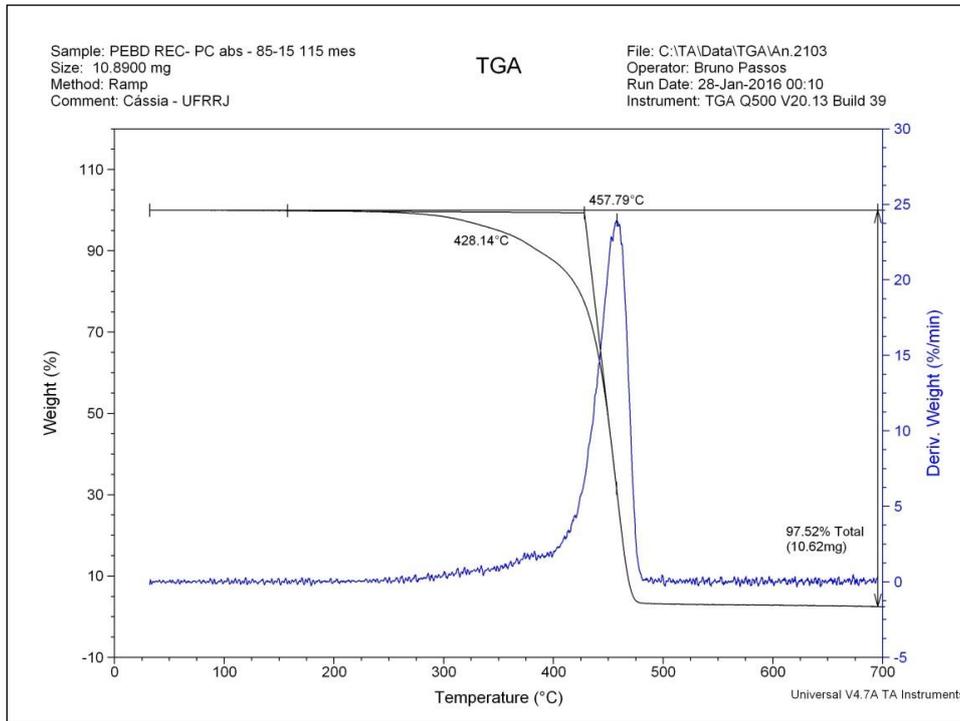
- Análise – TGA correspondente à mistura 85% de PEBDrec + 15% de Carcaça de telefone celular com granulometria de 42 mesh



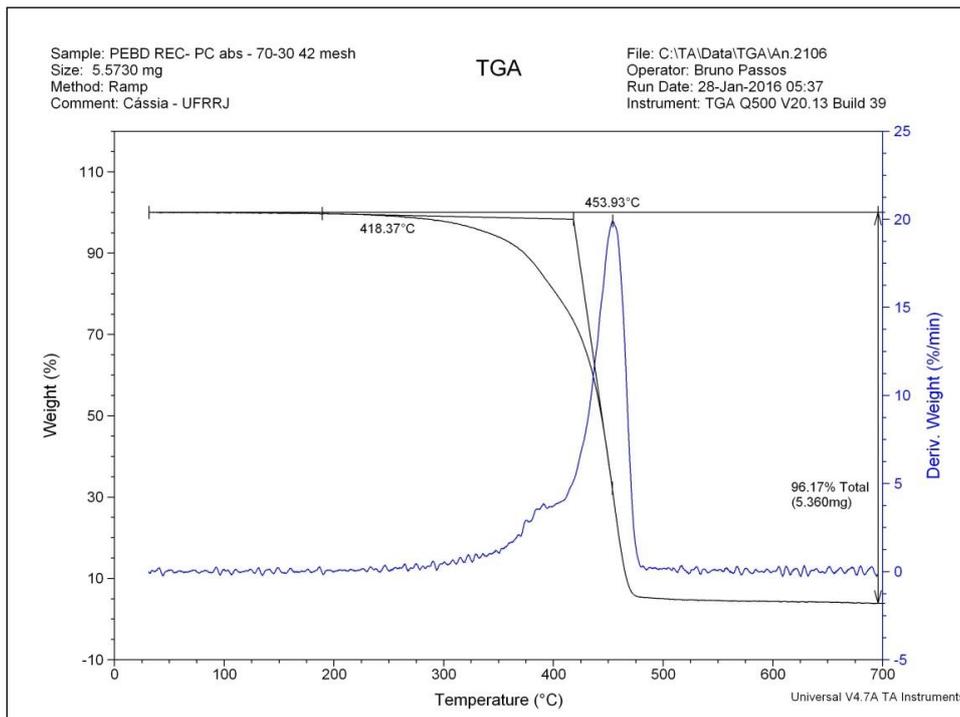
- Análise – TGA correspondente à mistura 85% de PEBDrec + 15% de Carcaça de telefone celular com granulometria de 60 mesh



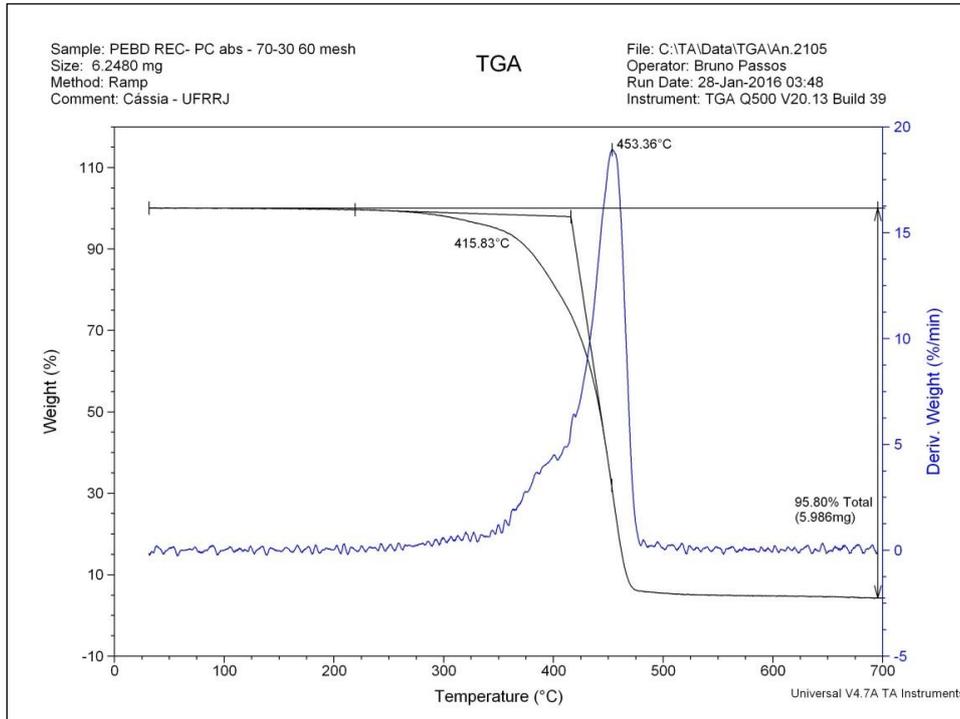
- Análise – TGA correspondente à mistura 85% de PEBDrec + 15% de Carcaça de telefone celular com granulometria de 115 mesh



- Análise – TGA correspondente à mistura 70% de PEBDrec + 30% de Carcaça de telefone celular com granulometria de 42 mesh



- Análise – TGA correspondente à mistura 70% de PEBDrec + 30% de Carcaça de telefone celular com granulometria de 60 mesh



- Análise – TGA correspondente à mistura 70% de PEBDrec + 30% de Carcaça de telefone celular com granulometria de 115 mesh

