



PGDESIGN | Programa de Pós-Graduação
Mestrado | Doutorado



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
FACULDADE DE ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN

Elisa Guerra Ashton

DESIGN, INOVAÇÃO E SUSTENTABILIDADE:
Estudo da Reciclagem de Produtos Multi-materiais Poliméricos sem Separação
Prévia

Tese de Doutorado

Porto Alegre

2017

ELISA GUERRA ASHTON

**Design, Inovação e Sustentabilidade: Estudo da Reciclagem de Produtos Multi-
materiais Poliméricos sem Separação Prévia**

Tese apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Design da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul, como
requisito parcial à obtenção do título de
Doutor em Design.

Orientador: Prof. Dr. Wilson Kindlein
Junior

Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Lauren da Cunha
Duarte

Porto Alegre

2017

Catlogação da Publicação

--

Elisa Guerra Ashton

**DESIGN, INOVAÇÃO E SUSTENTABILIDADE: Estudo da Reciclagem de
Produtos Multi-materiais Poliméricos sem Separação Prévia**

Esta Tese foi julgada adequada para a obtenção do Título de Doutor em Design, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS.

Porto Alegre, julho de 2017.

Régio Pierre da Silva

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS

Banca Examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Wilson Kindlein Junior

Departamento de Engenharia de Materiais (DMAT/UFRGS)

Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Lauren da Cunha Duarte

Departamento de Engenharia de Materiais (DMAT/UFRGS)

Prof^a. Dr^a. Tatiana Louise Avila de Campos Rocha

Universidade Unisinos

Prof^a. Dr^a. Carolina Bustos Raffainer

Escola Superior de Propaganda e Marketing (ESPM)

Prof. Dr. Hugo Marcelo Veit

Departamento de Engenharia de Materiais (DMAT/UFRGS)

Prof. Dr. Luis Henrique Alves Cândido

Departamento de Design e Expressão Gráfica (DEG/FA/UFRGS)

AGRADECIMENTOS

Ao longo da trajetória percorrida no desenvolvimento dessa tese contei com o auxílio e apoio de diversas pessoas e instituições. Inicialmente, gostaria de agradecer à minha família por ter me incentivado e apoiado, em especial, à minha mãe Sandra e ao meu noivo Edmundo. Agradeço também ao meu orientador, o Prof. Wilson Kindlein Junior, pelos ensinamentos, pela confiança e paciência a mim dedicados. Não posso deixar de citar todos os colegas e professores do Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM), em especial, o Prof. Luis Henrique A. Cândido e o colega Yuri Walter, que me ajudaram a desenvolver etapas importantes apresentadas na tese.

Agradeço ainda pela colaboração de vários laboratórios da UFRGS na disponibilização de seus equipamentos: ao LPA, em especial à Prof^a. Raquel Mauler e ao Renan Demori, à equipe do LAMAT, coordenada pelo Dr. Júlio César P. Vagheti, à equipe do LACOR, em especial ao Prof. Hugo Veit, ao Fernando Hamerski e ao Dilan, ao LACER, em nome da Prof^a Annelise Kopp Alves e do Matheus Cunha e à equipe do LDTM, em especial ao André e ao Diego.

Contei ainda com a infraestrutura e com a colaboração de pessoas de outras Universidades, por isso gostaria de fazer um agradecimento especial à Prof^a. Tatiana Rocha da Unisinos e ao Prof. Luiz Carlos Robinson da Universidade Feevale, pelo apoio, auxílio e disponibilização de equipamentos.

Finalmente, agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Programa de Pós-Graduação em Design pela oportunidade e confiança na minha pesquisa, assim como agradeço à CAPES pela bolsa de estudos a mim concedida e ao CNPq pela disponibilização de recursos à pesquisa.

RESUMO

O presente estudo trata de temas relacionados à seleção de materiais e ao design de produto frente às questões ambientais. Percebe-se atualmente a tendência de desenvolvimento de produtos insustentáveis, como é o caso dos multi-materiais. Apesar das vantagens técnicas, esses produtos são causadores de impactos ambientais negativos, já que apresentam dificuldades de reciclagem, decorrentes da complexidade na separação dos seus materiais. Na presente pesquisa discute-se, através de revisão bibliográfica e de estudos práticos, a necessidade de desenvolvimento de soluções a curto prazo para esse problema. O objetivo consiste em estudar a reciclagem de produtos multi-materiais, sem separação prévia, visando a utilização do material resultante em novas aplicações com valor agregado. O estudo divide-se em: (I) Revisão Bibliográfica, (II) Estudo Prático A e (III) Estudo Prático B. Na revisão bibliográfica apresenta-se o contexto teórico e científico a respeito dos temas centrais para posterior discussão dos resultados obtidos nas etapas práticas. O Estudo Prático A envolve a reciclagem de escovas de dente multi-materiais através de micronização. Posteriormente o material resultante foi caracterizado por microscopia eletrônica de varredura (MEV), teste de densidade, ensaio de tração e análise térmica dinâmico-mecânico (DMA). Apresentou-se ainda a seleção de potenciais áreas de aplicação para o novo material reciclado, por meio de Mapas de Propriedades de Materiais e teste de viabilidade da aplicação selecionada. No Estudo Prático B utilizam-se duas amostras com granulometrias distintas, para avaliar a influência do tamanho das partículas do material reciclado. Na etapa de caracterização, além dos ensaios conduzidos no Estudo A, realizou-se ainda distribuição granulométrica, ensaio de dureza, calorimetria exploratória diferencial (DSC) e análise termogravimétrica (TGA). Os resultados demonstraram a viabilidade técnica de se promover a reciclagem de escovas de dente multi-materiais por meio do processo de reciclagem mecânica tradicional sem separação prévia. O material reciclado apresentou potencial para ser utilizado na fabricação de laminado sintético para produção de calçados e componentes. Na avaliação da influência do tamanho das partículas, constatou-se que não houve influência significativa no material resultante. Destaca-se ainda como contribuição e tecnológica deste estudo a proposição de uma alternativa tecnicamente viável para a reciclagem de produtos teoricamente “não-recicláveis”, contribuindo com a redução da geração de resíduos sólidos.

Palavras-chave: Design de produto. Seleção de materiais. Produtos multi-materiais. Sustentabilidade. Inovação.

ABSTRACT

This study deals with issues related to product design and material selection, facing the environmental issues. Developments in design and materials usage unleashed the tendency of developing unsustainable products, as the multi-materials. These products cause severe negative environmental impacts, since its recycling is diffculted by the complexity in separating the materials. In this context, it is argued, through literature review and practical studies, the need of developing short-term solutions to this problem. The objective is to study multi-material products recycling, without previous sorting, aiming the use of the resulting material in applications with added value. The research is divided in three parts: (I) Bibliographic Review, (II) Practical Study A and (III) Practical Study B. Bibliographic Review presents the scientific and theoretic context regarding the central themes for later discussion of the results obtained in the practical parts. Practical Study A involves the reprocessing of multi-material toothbrushes through micronization. Subsequently, the resulting material is characterized by scanning electron microscopy (SEM), density test, tensile test and dynamic mechanical analysis (DMA). It is also presented the selection of potential areas of application for the new recycled material through Materials Properties Charts and a viability test of the selected application. In Practical Study B, two samples of different particle sizes were used to evaluate the influence of the recycled material's particle sizes. In the characterization stage, in addition to the tests conducted in Study A, granulometric distribution, hardness test, differential scanning calorimetry (DSC) and thermogravimetric analysis (TGA) were also performed. The results demonstrated the technical feasibility of reprocessing multi-material toothbrushes through the traditional mechanical recycling process, without previous sorting. The recycled material presented potential for application in synthetic laminates for shoes and components production. Regarding the particles size influence, it was found that there was no significant influence in the resulted material. There is also the technological contribution which is the proposition of an alternative for the recycling of theoretically "non-recyclable" products, contributing to the reduction of solid waste generation.

Keywords: Product design. Materials selection. Multi-material products. Sustainability. Innovation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Estrutura da pesquisa.....	17
Figura 2 - Evolução dos materiais ao longo dos anos	20
Figura 3 – Grade curricular da Bauhaus.....	22
Figura 4 - Desenvolvimento de produto e seleção de materiais e processos.....	23
Figura 5 - Exemplo de Mapa de Propriedades de Materiais	26
Figura 6 - Produtos multi-materiais	28
Figura 7 – Processo de co-injeção.....	28
Figura 8 - Ciclo de Vida Sistema-Produto	30
Figura 9 - Situação ideal e tendência atual de desenvolvimento de produtos	32
Figura 10 - Opções de gerenciamento de materiais no fim de vida do produto	33
Figura 11 - Inter-relação (1) que influencia a atividade de reciclagem.....	35
Figura 12 - Classificação tipos de reciclagem.....	36
Figura 13 - Fases da reciclagem mecânica.....	36
Figura 14 - Simbologia para identificação de materiais poliméricos	37
Figura 15 - Estruturas moleculares dos polímeros	45
Figura 16 - Representação do Polietileno	47
Figura 17 - Cadeias do PEAD, PEBD e PEBDL	47
Figura 18 - Representação do etileno-propileno-dieno	48
Figura 19 - Representação da poliamida 6.....	48
Figura 20 - Representação do Polipropileno.	49
Figura 21 - Estrutura básica do calçado	50
Figura 22 – Modelos das cinco escovas utilizadas no estudo (A) e pellets de PEBDL (B).....	54
Figura 23 - Parte II: Esquema dos métodos utilizados e relação dos mesmos com os objetivos específicos.....	54
Figura 24 - Equipamento de FTIR (A) e espectrômetro de fluorescência por Raio-X (B) utilizados nesse estudo	55
Figura 25 - Triturador (A) e moinho (B) utilizados no estudo.....	55
Figura 26 - MEV utilizado no estudo.....	56
Figura 27 - Extrusora (A) e picotador (B) utilizados no estudo	57
Figura 28 - Injetora utilizada no estudo	58
Figura 29 - Equipamento de ensaio universal (A), equipamento de DMA (B) e balança analítica (C) utilizados nesse estudo.....	59
Figura 30 - Etapas da seleção de aplicação baseada no método de similaridade	60
Figura 31 - Laminadora e prensa pneumática utilizadas nesse estudo.....	60

Figura 32 - Pontos da escova de dente que foram analisados no FTIR.....	61
Figura 33 - Espectros de FTIR do material presente no corpo das escovas de dente e no detalhe do modelo 3.....	62
Figura 34 - Espectros de FTIR do material do detalhe das escovas de dente 1, 2, 4 e 5.....	63
Figura 35 - Espectro de FTIR do material das cerdas das escovas	64
Figura 36 - Análise macroscópica da variação do tamanho das partículas geradas na trituração (A), na primeira micronização (B) e na segunda micronização (C).....	65
Figura 37 - Medições da amostra obtida após a trituração (1A a 1C), após a primeira micronização (2A a 2C) e após a segunda micronização (3A a 3C)	66
Figura 38 - Fio extrudado (A) e detalhe dos metais aparentes no fio (B)	68
Figura 39 - Corpos de prova injetados para DMA e determinação de densidade (A) e tração (B)	68
Figura 40 - Corpos de prova tracionados da amostra virgem (A) e da amostra reciclada (B)	69
Figura 41 - Gráfico tensão x deformação.....	70
Figura 42 - Curvas do módulo elástico para as amostras virgem e reciclada.....	70
Figura 43 - Curvas de tan delta para as amostras virgem e reciclada (A) e Tan Delta da amostra reciclada a 30°C (B).....	71
Figura 44 - Mapa de propriedades de materiais 1 (Tensão de escoamento/Densidade).....	73
Figura 45 - Mapa de propriedades de materiais 2 (Módulo de Young/Densidade)	73
Figura 46 - Mapa de propriedades de materiais 3 (Módulo de Young/Tensão de Escoamento). 74	
Figura 47 - Mapa de propriedades de materiais 4 (Tensão de Escoamento/Deformação)	74
Figura 48 - Mapa de propriedades de materiais 5 (Tan Delta/Módulo de Young)	74
Figura 49 - Etapas do processo de laminação	80
Figura 50 - Preparação do laminado em prensa pneumática e etapas da preparação de peças 1 e 2 para um chinelo	81
Figura 51 - Etapas da montagem de um cinto (peça-piloto 3)	81
Figura 52 - Processo de termoformagem (A) e contrafortes moldados (B)	82
Figura 53 - Escovas de dente embaladas (A), prontas para serem reprocessadas (B).....	87
Figura 54 - Parte III: Esquema dos métodos utilizados e relação dos mesmos com os objetivos específicos.....	87
Figura 55 - Equipamento de FTIR utilizado na Parte III do estudo	88
Figura 56 - Moinhos (A e B) e peneiras vibratórias (C) utilizados na Parte III da pesquisa.....	88
Figura 57 - Equipamento utilizado na distribuição granulométrica	89
Figura 58 - Separador eletrostático utilizado no estudo.....	90
Figura 59 - Lupa Estereoscópica utilizada no estudo.....	91
Figura 60 - Equipamento de DSC (A), de TGA (B), durômetro Shore D (C), entalhador manual (D) e equipamento de impacto Izod (E) utilizados nesse estudo.....	93

Figura 61 – Partes das escovas de dente utilizadas no estudo.....	94
Figura 62 - Espectro de FTIR do material do corpo do produto analisado	95
Figura 63 - Espectro de FTIR do material do detalhe do produto analisado.....	95
Figura 64 - Espectro de FTIR do material das cerdas do produto analisado.....	96
Figura 65 - Peças metálicas presentes no corpo da escova em relação ao material triturado (A) e detalhe dos metais (B).....	96
Figura 66 - Material separado nas peneiras vibratórias de acordo com a granulometria: G1(A) e G2 (B).....	97
Figura 67 - Histograma da distribuição granulométrica do material < 0,5mm (G2).....	98
Figura 68 - Amostra 1 (1A – 1C) e Amostra 2 (2A – 2C) após os processos de extrusão e injeção	98
Figura 69 - Vetorização das imagens geradas na lupa da amostra 1 (1A – 1C) e amostra 2 (2A – 2C).....	99
Figura 70 - Curvas Tensão x Deformação das amostras 1 e 2 (A) e comparativo de tenacidade (B)	100
Figura 71 - Curvas de DSC comparativo entre as amostras 1 e 2 (A) e comparativo entre todos os materiais analisados (B)	101
Figura 72 - Curvas de DSC para três tipos de TPV.....	102
Figura 73 - comparativo das curvas TG das amostras recicladas (A) e comparativo das curvas DTG para as amostras recicladas (B).....	103
Figura 74 - Comparativo entre as curvas TG de todos os materiais da mistura	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Granulometria do material micronizado	42
Tabela 2 - Padrão de temperatura utilizado na extrusão.....	57
Tabela 3 -Parâmetros de injeção	58
Tabela 4 - Mapas de propriedades de materiais	59
Tabela 5 - Materiais identificados nas escovas de dente estudadas	64
Tabela 6 - Médias obtidas no ensaio de tração para as amostras virgem e reciclada.....	69
Tabela 7 -Temperaturas de transição vítrea dos materiais presentes na amostra	72
Tabela 8 - Dados obtidos na caracterização da amostra reciclada e utilizados para a construção dos mapas de seleção	72
Tabela 9 - Desempenho do laminado estudado nos processos analisados	82
Tabela 10 - Granulometrias geradas.....	89
Tabela 11 - Composição das amostras 1 e 2	90
Tabela 12 - Parâmetros utilizados no ensaio de DSC	92
Tabela 13 - Identificação das bandas do espectro de FTIR do corpo do produto	94
Tabela 14 - Identificação das bandas do espectro de FTIR do detalhe do produto.....	95
Tabela 15 - Identificação das bandas do espectro de FTIR das cerdas do produto.....	96
Tabela 16 - Composição da liga de alumínio identificada pelo equipamento.....	97
Tabela 17 - Diâmetros médios do material < 0,5mm (G3)	97

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CP	Corpo de Prova
DfA	<i>Design for Assembly</i> (Design para a Montagem)
DfD	<i>Design for Disassembly</i> (Design para a Desmontagem)
DfMA	<i>Design for Manufacture and Assembly</i> (Design para Fabricação e Montagem)
DfR	<i>Design for Recycling</i> (Design para a Reciclagem)
DMA	<i>Dynamic Mechanical Analysis</i> (Análise Dinâmico-Mecânica)
DSC	<i>Differential Scanning Calorimetry</i> (Calorimetria de Varredura Diferencial)
EPDM	Etileno-polipropileno-dieno
FTIR	Infravermelho por Transformada de Fourier
LACER	Laboratório de Materiais Cerâmicos
LACOR	Laboratório de Corrosão, Proteção e Reciclagem de Materiais
LdSM	Laboratório de Design e Seleção de Materiais
LDTM	Laboratório de Transformação Mecânica
LPA	Laboratório de Polímeros Avançados
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MPM	Mapa de Propriedades de Materiais
NMR	Novo Material Reciclado
PA	Poliâmida
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PEBDL	Polietileno de Baixa Densidade Linear
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PP	Polipropileno
PVC	Policloreto de Vinila
Tg	Temperatura de Transição Vítrea
TGA	Termogravimetria
TPE	Elastômero Termoplástico
TPE-V	Elastômero Termoplástico Vulcanizado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 ESTRUTURA DA PESQUISA	16
2 OBJETIVOS	18
2.1 OBJETIVO GERAL	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA (PARTE I)	19
3.1 O DESIGN DE PRODUTO E SUA RELAÇÃO COM OS MATERIAIS	19
3.1.1 Seleção de aplicações e Mapas de Propriedades de Materiais (MPM)	24
3.2 EVOLUÇÃO DOS MATERIAIS POLIMÉRICOS AOS MULTI-MATERIAIS: DESIGN FOR ASSEMBLY (DfA) VERSUS DESIGN FOR DISASSEMBLY (DfD)	27
3.2.1 Ecodesign e DfD	30
3.3 RECICLAGEM DE MATERIAIS POLIMÉRICOS: IMPORTÂNCIA E CONTEXTO ATUAL	33
3.3.1 Processos tradicionais de reciclagem de polímeros	35
3.3.1.1 Reciclagem Mecânica	36
3.3.1.2 Reciclagem Química	37
3.3.1.3 Recuperação Energética	38
3.3.2 Reciclagem de produtos poliméricos multi-materiais	38
3.3.3 Cominuição das partículas do material por micronização	41
3.4 POLÍMEROS	44
3.4.1 Polietileno – PE	46
3.4.2 Etileno-propileno-dieno – EPDM	47
3.4.3 Poliamida – PA	48
3.4.4 Polipropileno – PP	49
3.4.5 Elastômero Termoplástico – TPE	49
3.5 DESIGN DE CALÇADOS	50
4 ESTUDO PRÁTICO A (PARTE II)	53
4.1 MATERIAIS E MÉTODOS – ESTUDO PRÁTICO A	53
4.1.1 Materiais	53
4.1.1.1 Condição do material	53
4.1.2 Métodos	54
4.1.2.1 Identificação dos materiais contidos no produto	54
4.1.2.2 Trituração e micronização	55
4.1.2.3 Verificação da morfologia e tamanho de algumas partículas geradas	55
4.1.2.4 Preparação da mistura e extrusão	56
4.1.2.5 Injeção	57
4.1.2.6 Caracterização	58

4.1.2.7 Seleção de potenciais áreas de aplicação para o material resultante	59
4.1.2.8 Teste de viabilidade de utilização do novo material reciclado na fabricação de laminado sintético para aplicação na indústria calçadista	60
4.2 RESULTADOS DO ESTUDO PRÁTICO A	61
4.2.1 Identificação dos materiais contidos no produto	61
4.2.2 Trituração e Micronização	64
4.2.3 Verificação da morfologia e tamanho das partículas geradas	65
4.2.4 Extrusão e injeção	67
4.2.5 Caracterização	68
4.2.6 Seleção de aplicações para o material resultante.....	72
4.2.7 Teste de viabilidade de utilização do novo material reciclado na fabricação de laminado sintético para aplicação na indústria calçadista.....	79
4.3 DISCUSSÃO DO ESTUDO PRÁTICO A	83
5 ESTUDO PRÁTICO B (PARTE III)	86
5.1 MATERIAIS E MÉTODOS – ESTUDO PRÁTICO B	86
5.1.1 Materiais.....	86
5.1.1.1 Condição do material.....	86
5.1.2 Método	87
5.1.2.1 Identificação dos materiais contidos no produto	87
5.1.2.2 Trituração e Moagem – Obtenção de três granulometrias distintas.....	88
5.1.2.3 Identificação do tamanho médio das partículas menores que 0,5mm	89
5.1.2.4 Separação dos metais.....	90
5.1.2.5 Preparação da mistura e Extrusão	90
5.1.2.6 Injeção.....	91
5.1.2.7 Visualização da morfologia do material injetado	91
5.1.2.8 caracterização.....	92
5.2 RESULTADOS DO ESTUDO PRÁTICO COMPLEMENTAR	94
5.2.1 Identificação dos materiais contidos no produto.....	94
5.2.2 Obtenção das duas granulometrias e identificação do tamanho das partículas geradas.....	97
5.2.3 Visualização da morfologia do material após a injeção	98
5.2.4 Caracterização	99
5.3 DISCUSSÃO DO ESTUDO PRÁTICO B	104
6 CONCLUSÃO	106
7 TRABALHOS FUTUROS.....	108
ANEXO A – FOLHA DE DADOS PEDBL.....	109
ANEXO B – PRODUÇÃO DECORRENTE DA TESE.....	110
REFERÊNCIAS	111

1 INTRODUÇÃO

As questões ambientais vêm sendo tratadas com extrema preocupação e importância por diversas áreas do conhecimento, na tentativa de redução dos danos causados pelos impactos ambientais negativos. Na presente pesquisa, a problemática ambiental é abordada no âmbito do design de produto e seleção de materiais. O tema é introduzido através da análise histórica da evolução dos materiais e sua influência no design de produto até o surgimento dos polímeros e dos multi-materiais poliméricos. Discute-se, portanto, a convergência dessa evolução para o desenvolvimento de produtos insustentáveis e possíveis soluções para tal situação.

Sabe-se que a seleção de materiais é indissociável da atividade de projeto de produto (ASHBY; JOHNSON, 2002). Em relação ao surgimento de novos materiais, Ashby (2011) demonstra que a evolução dos mesmos acompanha o desenvolvimento de novos produtos, e de maneira mais ampla, a evolução da sociedade. A partir de 1900, por exemplo, diversos tipos de polímeros começam a surgir, de maneira que, por meados dos anos 60, esses materiais passam a substituir outros, tradicionalmente usados em diferentes segmentos, dando origem à chamada "Idade dos Polímeros" (THOMAS; YANG, 2009).

A extensa gama de materiais poliméricos disponíveis possibilitou ao designer criar novas formas, desenvolver conceitos inovadores e gerar sensações diferenciadas no usuário. Do mesmo modo, a diversidade de materiais disponíveis atualmente (especialmente os poliméricos), somada ao desenvolvimento tecnológico e ao maior rigor nos requisitos do produto, converge para a tendência de desenvolvimento de produtos com diferentes materiais em um mesmo componente, os chamados multi-materiais (THOMAS; YANG, 2009). Nesse ponto, cabe destacar o risco que se instala através dessa tendência: os processos de reciclagem tradicionais que possibilitam o gerenciamento do ciclo fechado (WORRELL; REUTER, 2014) e da logística reversa (LEITE, 2009) geralmente dependem da separação dos materiais (MANZINI; VEZZOLI, 2002). Não sendo possível a separação eficiente, o reprocessamento dos polímeros misturados apresenta dificuldades como a obtenção de uma mistura homogênea, devido às diferenças de ponto de fusão e viscosidade, além da presença de contaminantes como pigmentos, por exemplo (GOODSHIP, 2007; LA MANTIA; SCAFFARO, 2014). Assim sendo, é inevitável a dificuldade de reprocessamento dos

produtos multi-materiais poliméricos pelo processo tradicional de reciclagem mecânica. Cabe salientar ainda que o reprocessamento é apenas a primeira barreira a ser vencida, uma vez que polímeros misturados reciclados apresentam propriedades desconhecidas, o que dificulta sua reinserção no ciclo produtivo. Assim, se faz necessária a busca por aplicações para esse novo material reciclado, para que o mesmo possa integrar as cadeias de reciclagem (gerando renda) e ser reinserido no mercado. Nesse sentido, a dificuldade de reprocessamento desses produtos somada à falta de aplicações adequadas ao material resultante do reprocessamento culminam em sérios problemas que permeiam questões ambientais (AGUADO; SERRANO, 1999; KOUSHAL et al., 2014) e econômicas (JUCÁ, 2003; SJÖSTRÖM; ÖSTBLOM, 2010).

Diante da tendência de desenvolvimento e descarte de produtos insustentáveis, muito se fala na aplicação do ecodesign como solução a ser alcançada no longo prazo. Entretanto, percebe-se a necessidade de se buscar soluções a curto prazo, que complementem os tradicionais *Design for Disassembly* (DfD – Design para a Desmontagem) e o *Design for Recycling* (DfR – Design para a Reciclagem) através do caminho inverso. Por caminho inverso, entende-se a possibilidade de reciclagem de produtos que não tiveram a aplicação de preceitos de ecodesign, como é o caso dos multi-materiais poliméricos, permitindo o reprocessamento e aplicação em novos produtos sem a necessidade de separação dos materiais.

Diante do exposto, a presente pesquisa tem como objetivo geral estudar a reciclagem mecânica de produtos multi-materiais poliméricos, sem separação prévia, visando a utilização do material resultante em novas aplicações com valor agregado. Os objetivos propostos nessa pesquisa se justificam por estarem em conformidade e contribuir com questões legais. Entre tais questões, encontra-se o direito fundamental assegurado pela Constituição Federal (1988) em seu artigo 225, dispositivo que garante a todos “o meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à Coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações”. Além da Constituição Federal de 88, a qualidade do meio ambiente é objeto de normas mais recentes e específicas que refletem a atual preocupação do Poder Legislativo em criar regulamentações que possam garantir os caminhos para o desenvolvimento sustentável. Um exemplo é a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/10) que classifica,

em seu artigo 9º, a reutilização e a reciclagem como prioridades na questão do gerenciamento de resíduos sólidos.

Destaca-se também que se trata de tema original na geração de conhecimento, envolvendo questões de sustentabilidade e tecnologia na área do design e seleção de materiais. Atualmente, a importância do estudo dos materiais no Brasil é alicerçada pela Resolução nº 5 de 2004 do Conselho Nacional de Educação. O Artigo 5º, inciso I, dessa resolução determina que o estudo dos materiais deve ser contemplado nos projetos pedagógicos e na organização curricular dos cursos de graduação em Design. Da mesma forma, o Documento de Área da CAPES 2013, referente às áreas de Arquitetura, Urbanismo e Design, destaca como alguns dos princípios gerais norteadores do ensino e da pesquisa nessas matérias “a inovação nos processos de desenvolvimento de novos produtos, no que tange às referências metodológicas, tecnológicas, de materiais e de produção”, além da “associação dos princípios de sustentabilidade às questões inerentes à Área, em suas múltiplas dimensões”. O estudo apresenta ainda uma contribuição no âmbito econômico e social. Trata do desenvolvimento de práticas que estimulam e qualificam a indústria da reciclagem, setor gerador de emprego e renda. Além disso, a pesquisa se justifica por contribuir com a geração de conhecimento no estudo do design na busca pela sustentabilidade através do reprocessamento de materiais descartados como alternativa ao DfD e ao DfR. Por fim, destaca-se que esse estudo tem caráter interdisciplinar, já que envolve a geração de soluções que abrangem, além do design e de questões ambientais, a área de ciência dos materiais e processos de fabricação.

1.1 ESTRUTURA DA PESQUISA

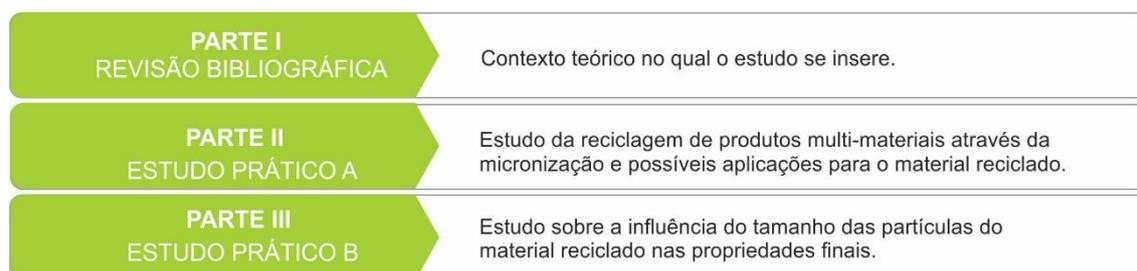
A presente pesquisa está estruturada em três partes. Na Parte I, foi construída a revisão bibliográfica, que apresenta o contexto teórico no qual a pesquisa se insere. Essa etapa serviu de embasamento para as discussões levantadas nas etapas práticas da pesquisa.

A Parte II constitui um estudo prático (chamado de Estudo Prático A), a partir do qual se buscou avaliar a possibilidade de reprocessar multi-materiais co-injetados através da cominuição das partículas e verificar as principais características do material reciclado resultante em comparação com o polímero virgem utilizado como matriz. A

Parte II apresenta ainda a seleção de potenciais áreas de aplicação para o material reciclado através da construção de Mapas de Propriedades de Materiais no software CES Edupack, além de teste de viabilidade da aplicação selecionada.

Na Parte III é apresentado um estudo complementar (chamado de Estudo Prático B), no qual a reciclagem dos produtos multi-materiais foi reproduzida com base no Estudo Prático A, porém com um volume maior de material e com o objetivo de verificar a influência do tamanho das partículas do material micronizado ($<0,5\text{mm}$) ou apenas triturado ($>1\text{mm} < 2\text{mm}$). Percebeu-se, ao longo do Estudo Prático A, que para se atingir granulometrias uniformes menores que $0,5\text{mm}$ pelo método de micronização utilizado no estudo, diversos ciclos de moagem são necessários, o que torna o processo menos eficiente e gera uma maior perda de material. Por isso, a possibilidade de se trabalhar com um tamanho maior de partículas sem grandes perdas de propriedades é atraente e merece uma investigação. Para uma visualização mais clara, a Figura 1 ilustra a estrutura da presente pesquisa.

Figura 1- Estrutura da pesquisa



2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar a reciclagem mecânica de produtos multi-materiais poliméricos, sem separação prévia, visando a utilização do material resultante em novas aplicações com valor agregado.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

-
- 1 Compreender o contexto teórico e científico que envolve a reciclagem de produtos multi-materiais, a micronização e a seleção de materiais/aplicações no Design de Produto;
 - 2 Identificar os materiais presentes no produto multi-material estudado;
 - 3 Estudar o processo de micronização aplicado na reciclagem de escovas de dente multi-materiais;
 - 4 Avaliar a viabilidade técnica de aplicação dos processos de extrusão e injeção ao material estudado como carga em polímero virgem;
 - 5 Caracterizar o material resultante do reprocessamento das escovas de dente estudadas;
 - 6 Investigar possíveis aplicações para o material resultante do reprocessamento das escovas de dente estudadas;
 - 7 Testar o material resultante na aplicação selecionada;
 - 8 Avaliar a influência do tamanho das partículas do multi-material reciclado nas propriedades do material resultante.
-

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA (PARTE I)

No presente capítulo apresenta-se o contexto teórico no qual a pesquisa se insere. A revisão bibliográfica aborda temas relacionados ao design de produto, seleção de materiais, reciclagem e materiais poliméricos. As discussões aqui levantadas serão utilizadas como embasamento para as conclusões dos estudos práticos.

3.1 O DESIGN DE PRODUTO E SUA RELAÇÃO COM OS MATERIAIS

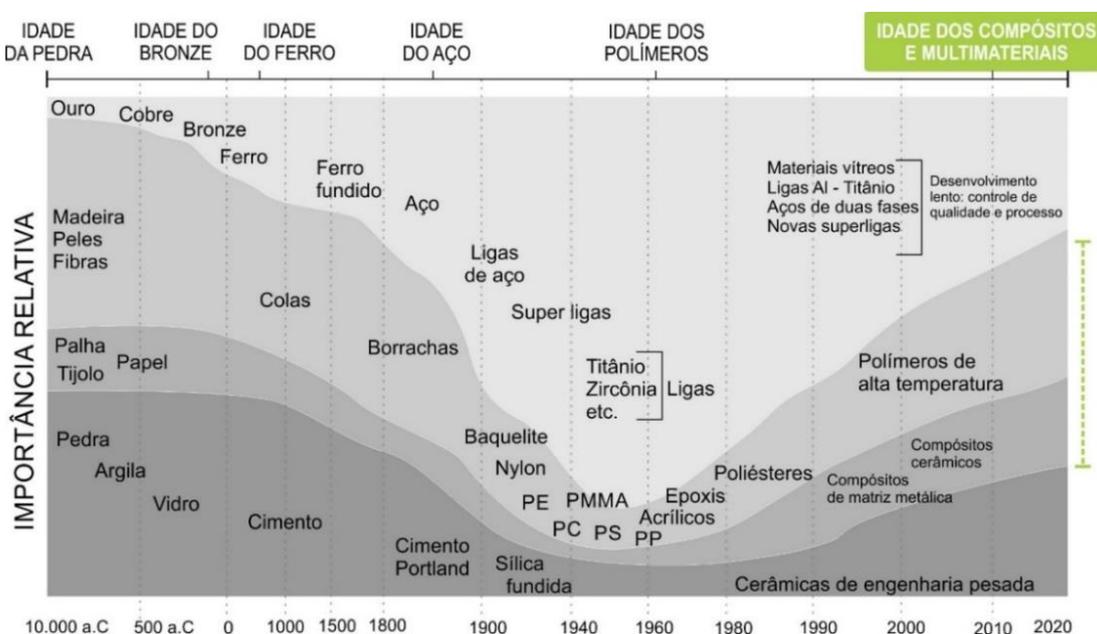
O design atual exerce grande influência sobre a vida contemporânea, já que envolve diferentes áreas do conhecimento e possui aplicação em diversas esferas, desde o design gráfico, passando pelo produto, até o design de serviços (MARGOLIN; BUCHANAN, 1995). Nessa pesquisa, abordam-se, especificamente, questões que envolvem a seleção de materiais e de aplicações no design de produto, temas que serão discutidos nesse capítulo, partindo de uma breve contextualização histórica das origens do design de produto.

Etimologicamente, a palavra *design* tem origem no italiano *disegno*, termo utilizado desde o renascimento para determinar a elaboração ou o desenho de uma obra de arte (CARDOSO, 2008). Por volta do século XVI, o termo design passa a ser utilizado na Inglaterra para determinar um plano a partir do qual algo será criado (HAUFFE, 1998). Para definir design em conceitos atuais, alguns autores (REIZMAN, 2003; BÜRDECK, 2005) fazem referência ao *Oxford English Dictionary*, que traz duas ideias relativas ao design. A primeira delas é referente aos elementos de uma obra de arte e à consciência na forma como os mesmos são arranjados. Nesse sentido, o design tem relação com as artes visuais, desde pinturas, esculturas e gravuras. O segundo conceito se refere à concepção da forma de um objeto, caracterizado muitas vezes por um projeto, desenho, modelo ou conjunto de instruções que são o primeiro passo no processo que leva ao produto final. Aqui se percebe a relação com as áreas de projeto, como engenharia e a interação entre materiais, produção e montagem. Nesse sentido, a atividade de conferir forma e função a objetos pode ser identificada ao longo da história da humanidade desde a antiguidade, passando pelo Renascimento – com Leonardo da Vinci (BÜRDECK, 2005), até se tornar um diferencial competitivo para as empresas na idade contemporânea (HESKETT, 2005). Apesar do reconhecimento de obras de design

em tempos passados, o profissional denominado de designer industrial ou designer de produto surgiu apenas nos século 20, como a divisão do trabalho e a especialização, características da indústria moderna de larga escala (CONWAY, 1999).

A industrialização foi um dos fatores que influenciou a evolução ao design moderno, o desenvolvimento da energia a vapor possibilitou a criação de diversas máquinas e equipamentos capazes de processar novos materiais, como o ferro fundido, por exemplo (HAUFFE, 1998). Em relação ao surgimento de novos materiais, Ashby (2011) demonstra que a evolução dos mesmos acompanha o desenvolvimento de novos produtos e de maneira ainda mais abrangente, a evolução da sociedade (Figura 2).

Figura 2 - Evolução dos materiais ao longo dos anos



Fonte: Adaptado de Ashby (2011)

Um exemplo são as denominações clássicas dos períodos conhecidos como Idade da Pedra ou Idade dos Metais. Atualmente, considera-se que vivemos a Idade dos Polímeros (THOMAS; YANG, 2009), sendo que num futuro próximo, estima-se a chegada da Idade dos Compósitos e Multi-materiais. Tal estimativa se baseia nos requisitos de projeto de produto caracterizados pela necessidade de incorporar cada vez mais propriedades em um mesmo produto sem aumentar custos, o que converte para a tendência de vasta utilização de compósitos e multi-materiais nos próximos anos (WARGNIER et al., 2014).

Esse fenômeno é descrito também por Cogswell (2013), que utiliza o termo “*Designed Materials Era*” para descrever a tendência atual de utilização de materiais misturados na busca por propriedades específicas para um determinado fim.

A partir desse panorama, pode-se considerar que a evolução dos materiais é responsável por grande parte (senão pela maioria) das inovações em produto, serviço e processo (PFAHL; RACK, 2003). A chegada de novos materiais, possibilitada pelo avanço da tecnologia, transformou a aparência do ambiente moderno, trazendo novos desafios e possibilidades aos designers. Nesse contexto, o design estabelece uma importante relação entre forma, materiais, tecnologia e sociedade, relação essa que nem sempre se desenvolveu positivamente.

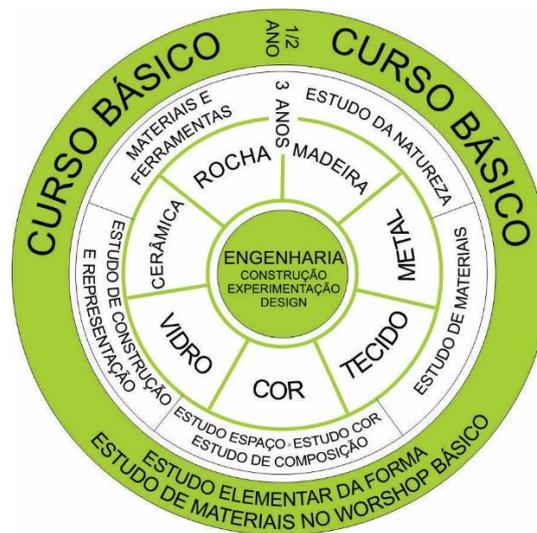
Nesse sentido, Kindlein Jr. et al. (2006) cita Escorel (1999) para demonstrar que a adaptação de novos materiais inovadores, na área do design, está relacionada a fatores mercadológicos e econômicos. Logo, para que a inovação seja bem sucedida é necessário que exista interesse e apropriação comercial pela sociedade. Para exemplificar, Sparke (2013) cita o caso de dois materiais: o primeiro diz respeito ao surgimento da semi-sintética celuloide que foi amplamente aceita, tornando-se uma substituta para outros materiais mais caros. Já o segundo, o alumínio, apenas foi utilizado com sucesso tempos depois da sua descoberta, graças ao desenvolvimento de novas tecnologias que permitiram a sua produção com custo mais baixo e à evolução conceitual do design, que passou a visualizar o material como um conceito de contemporaneidade. Assim sendo, deve-se considerar que a incorporação de avanços científicos (tais como o surgimento de novos materiais) em novos produtos pode levar décadas e tomar caminhos inesperados (PFAHL; RACK, 2003).

Para uma compreensão ampla da transição pela qual passam os materiais, do laboratório para a sociedade, é necessário ter uma visão holística interdisciplinar (WILKES et al., 2015). Ela leva em consideração a importância da seleção de materiais e a influência que ela representa, não apenas ao produto final, mas na relação com o consumidor. De acordo com Jahan e Edwards (2013), o material tem influência nas funções do produto, na satisfação do consumidor, no sistema de produção, no ciclo de vida, na usabilidade, na personalidade do produto, nas questões de meio ambiente e em custos de uma forma complexa. Van Kersteren et al. (2007) contribuem no que diz respeito à satisfação do consumidor através da seleção dos materiais. Para os autores, a percepção do produto pelo consumidor é subjetiva, assim sendo, o designer tem o

desafio de transpor valores e sentimentos em propriedades e características técnicas dos materiais, o que requer conhecimento específico de seleção de materiais.

O estudo da seleção de materiais é fundamental para o design no desenvolvimento de produto, conforme literatura (FERRANTE; WALTER, 2010; KARANA et al., 2014; ASHBY; JOHNSON, 2002; MALEQUE; SALIT, 2013; LESKO, 2008; KINDLEIN JR. et al., 2006). Para reforçar essa afirmação, Van Bezooen (2014) lembra que esse processo é claramente demonstrado pelo modelo educacional da Bauhaus, escola pioneira no estudo do design, fundada por Walter Gropius em 1919. De acordo com Bonsiepe (2012, p. 74), o objetivo pedagógico da Bauhaus consistia em “familiarizar o aluno com materiais e processos de fabricação por meio de uma experiência concreta (aprender fazendo)”. Para uma melhor compreensão dessa estrutura educacional, a Figura 3 mostra a grade curricular da Bauhaus.

Figura 3 – Grade curricular da Bauhaus



Fonte: Adaptado de Droste (2002)

A Figura 3 demonstra a importância do conhecimento sobre materiais e suas propriedades desde o início dos estudos em design, especialmente através da experimentação (BÜRDECK, 2005). Apesar da grande importância do estudo dos materiais para o design de produto, Van Bezooen (2014) lembra que os processos tradicionais de seleção de materiais em design geralmente acontecem nas fases finais do desenvolvimento, e os critérios de seleção são definidos como fabricação e custo, para permitir a materialização de um conceito avançado de produto (BAXTER, 2000; MUNARI, 2002; LÖBACH, 2001).

O que Van Bezooyen (2014) discute é a inversão dessa sistemática, a chamada "*materials driven design*", ou seja, a exploração e o contato com os materiais que direcionam as diretrizes do projeto de produto. Para o autor, a exploração de materiais é um dos maiores desafios enfrentados pelos designers, uma vez que a enorme gama de materiais existentes exige um processo de seleção criativo e analítico para encontrar o material certo para o produto certo. A centralização do desenvolvimento de produto na seleção de materiais pode ser argumentada com base na capacidade dos materiais de atribuir muitos significados e conceitos ao produto. Van Bezooyen (2014) afirma que os materiais são o elemento chave na construção da experiência presente no produto final. Ferrante e Walter (2010) destacam que o material tem o poder de radicalizar o produto, de apresentá-lo sob uma nova luz, conferindo-lhe uma nova dimensão cultural.

Ashby et al. (2014), por outro lado, apresentam uma posição menos radical em relação à seleção de materiais no design de produto. Segundo os autores, os materiais não constituem o centro do processo de desenvolvimento de produto, como sugere Van Bezooyen (2014). São as necessidades do mercado que orientam fundamentalmente a criação de novos produtos. Entretanto, as informações sobre materiais são necessárias em todas as etapas do desenvolvimento. Em cada fase, existem diferentes níveis de profundidade e precisão dessas informações (ASHBY et al., 2014).

A Figura 4 demonstra mais claramente essa sistemática de desenvolvimento de produto e seleção dos materiais.

Figura 4 - Desenvolvimento de produto e seleção de materiais e processos



Fonte: Adaptado de Ashby et al. (2014)

De acordo com Ashby et al. (2014), as linhas tracejadas da Figura 4 sugerem a possibilidade de interação entre as etapas. Isso demonstra a não linearidade que o processo de seleção de materiais exige. A grande gama de materiais disponíveis torna a seleção de materiais ainda mais complexa e importante para o sucesso do desenvolvimento de produto.

Desatacada a importância inegável que os materiais exercem sobre o design de produto, sem esquecer a influência do contexto mercadológico, econômico e social no qual os novos produtos devem se inserir, entende-se por adequado o grau de importância concedido por Ashby et al. (2014) à seleção de materiais no design de produto. Tal posição se baseia na necessidade de adequação dos produtos a um contexto social, econômico e tecnológico específico (caracterizado pelas necessidades de mercado), que, conforme abordado nos parágrafos anteriores, pode definir o sucesso do produto em questão. Nesse panorama, não se deve esquecer a capacidade dos materiais de atribuir significado ao produto, influenciar custos, definir questões técnicas de fabricação, questões ambientais etc. Dessa forma, é oportuna a abordagem de materiais ao longo de todo o desenvolvimento de produto, ponderando o aprofundamento da seleção de acordo com as necessidades de cada etapa do processo.

3.1.1 Seleção de aplicações e Mapas de Propriedades de Materiais (MPM)

Considerando a capacidade dos materiais de influenciar aspectos ambientais do produto, existem diversos métodos de seleção de materiais para produtos sustentáveis (BOVEA; VIDAL, 2004; LJUNGBERG, 2007; ALMEIDA et al., 2010; PLATCHECK et al., 2008; PRENDEVILLE et al., 2014). Entretanto, o caminho contrário é pouco explorado: a seleção de aplicações para materiais reciclados. Essa sistemática inversa se torna extremamente importante quando se trata de materiais derivados da reciclagem de polímeros misturados (ou multi-materiais), uma vez que as propriedades do material final são diferentes das características do produto original. O reprocessamento de diferentes materiais poliméricos pode ser um desafio, principalmente em relação à obtenção de um material final com boas propriedades mecânicas. A principal dificuldade do reprocessamento de polímeros misturados é a obtenção de uma mistura homogênea. Isso se deve às diferenças de viscosidade e ponto de fusão entre os polímeros da mistura (GOODSHIP, 2007; LA MANTIA E SCAFFARO, 2014), além

da presença de contaminantes como pigmentos, por exemplo, que também pode influenciar na homogeneidade da mistura (GOODSHIP, 2007).

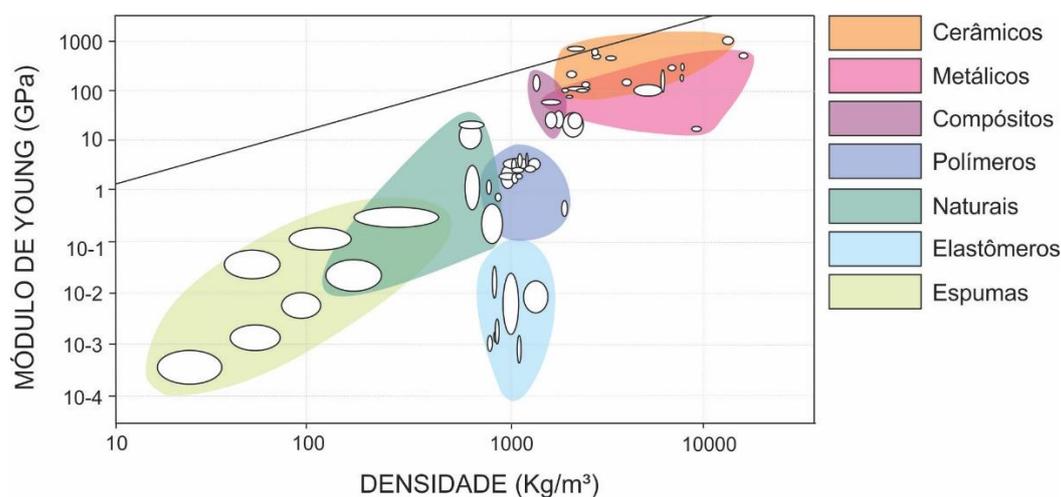
Dessa forma, grande parte dos polímeros reciclados acaba sendo reutilizada como carga em aplicações de baixo valor agregado, como concreto (ISAMAIL; AL-HASHMI, 2008; SIDDIQUE et al., 2008; RAO et al., 2007; KATZ, 2003) e asfalto (REZENDE; CARVALHO, 2003; AKBULUT; GÜRER, 2007; HUANG et al., 2007; CHIU et al., 2008), o que, muitas vezes, não aproveita todo o potencial do material. São poucos os estudos que aplicaram material polimérico reciclado em produtos com valor agregado. Um exemplo é o caso da empresa de fotocopiadoras Xerox, descrito no estudo de Kerr e Ryan (2001). De acordo com os referidos autores, a Xerox reutiliza partes de produtos no fim-de-vida na fabricação de novos componentes com a mesma funcionalidade e qualidade dos produtos novos. A Xerox chegou a economizar milhões de dólares em compra de material virgem e custos com disposição final de resíduos (KERR; RYAN, 2001). Entretanto, é preciso destacar que o processo adotado nesse caso envolve as etapas de desmontagem e separação dos materiais do produto, sendo reprocessados apenas polímeros do mesmo tipo e mesma formulação, o que difere da proposta da presente pesquisa.

Em relação a polímeros misturados reciclados, o estudo de Ashory e Nourbakhsh (2009) investigou a reciclagem de polietileno de alta densidade, polipropileno e fibra de jornal para a fabricação de painéis compósitos experimentais. O resultado demonstrou que materiais misturados podem ser utilizados para a fabricação de painéis com valor agregado sem comprometimento significativo das propriedades necessárias no produto (ASHORY; NOURBAKHS, 2009).

Considerando a importância de se buscar potenciais aplicações com valor agregado para um multi-material polimérico reciclado, a presente pesquisa utilizou como ferramenta Mapas de Propriedades de Materiais (MPM). A construção de MPM é um procedimento desenvolvido pelo Professor da Universidade de Cambridge, Michael F. Ashby, tal procedimento foi implementado em software por Ashby e Cebon (1993). Os MPM consistem em gráficos contendo uma ou mais propriedades em seus eixos, de maneira que os materiais aparecem distribuídos conforme seus valores para as propriedades selecionadas. A Figura 5 representa um exemplo de MPM com as propriedades de Densidade e Módulo de Young nos eixos x e y, respectivamente. Na

Figura 5, os materiais são representados pelas esferas brancas, enquanto que as formas coloridas constituem as famílias de materiais. Essa estratégia correlaciona simultaneamente propriedades e demais características de materiais, através de índices de mérito¹ (representada pela linha que corta o mapa na Figura 5) possibilitando uma comparação única de diversos aspectos dos materiais.

Figura 5 - Exemplo de Mapa de Propriedades de Materiais



Fonte: Adaptado de Ashby et al., 2014.

Esse é um método versátil que permite diversas abordagens, tais como: (a) a tradicional seleção de material para uma aplicação específica (ASHBY, 2000); (b) a seleção de processos de fabricação (ASHBY et al., 2004); (c) o desenvolvimento de materiais híbridos com o objetivo de obter materiais com um conjunto de propriedades que nenhum outro possui (ASHBY; BRÈCHET, 2003); (d) Comparação e substituição de materiais para redução de custo (GRANTA DESIGN, 2016); entre outras. Na presente pesquisa, os MPM foram construídos no software *Cambridge Engineering Selector* (CES Selector Edupack) com o objetivo de buscar potenciais aplicações para um multi-material polimérico reciclado.

Apresentado o panorama da seleção de materiais e de aplicações no design de produto, cabe aprofundar a discussão abordando a questão dos materiais poliméricos, família de materiais que constitui o foco do presente estudo. Para tanto, no tópico seguinte aborda-se a crescente aplicação de polímeros em diversos produtos até o

¹ Uma fórmula algébrica (geralmente uma fração, em sua forma mais simples) que expressa um compromisso entre duas características ou propriedades. No MPM o índice de mérito é representado por uma linha de seleção (FERRANTE, 2000).

surgimento dos multi-materiais moldados por co-injeção e suas consequências tecnológicas e ambientais.

3.2 EVOLUÇÃO DOS MATERIAIS POLIMÉRICOS AOS MULTI-MATERIAIS: *DESIGN FOR ASSEMBLY* (DfA) *VERSUS DESIGN FOR DISASSEMBLY* (DfD)

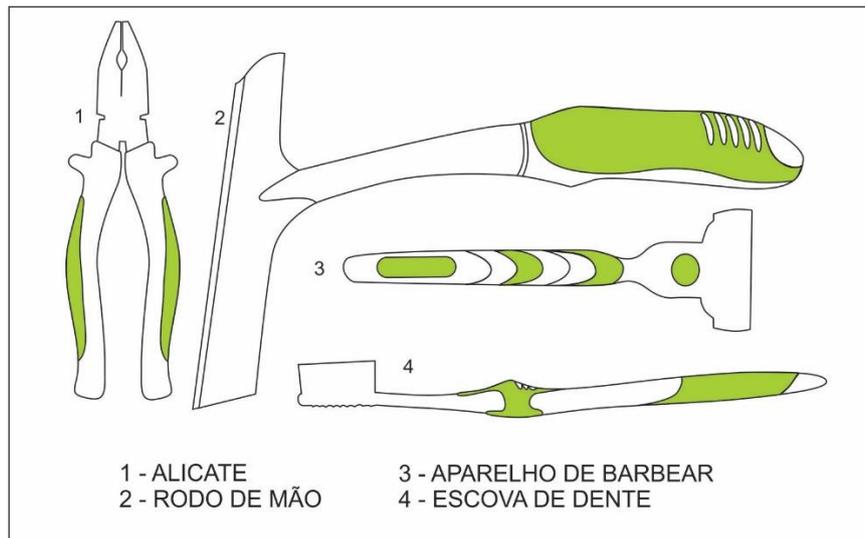
Os polímeros revolucionaram a forma como os designers e os consumidores percebem o produto (JULIER, 2013). Desde o desenvolvimento da bakelite, em 1907 (LOKENS GARD, 2010), até a atual proliferação dos polímeros, a sociedade produziu, consumiu e descartou uma quantidade enorme de material (GABRYS et al., 2013). Tal demanda por materiais poliméricos se intensificou após a Segunda Guerra Mundial e continuou a crescer rapidamente ao longo dos anos (ALLWOOD; CULLEN, 2012). Essa grande importância que o material tomou estimulou o surgimento de pesquisas sobre novos tipos de polímeros, novas formas de processamento, novas aplicações etc. Como consequência, a grande diversidade de polímeros disponíveis resultou na utilização conjunta de mais de um tipo de material, os chamados multi-materiais (THOMAS; YANG, 2009).

Outros fatores também influenciaram o surgimento de multi-materiais, Wargnier et al. (2014) lembram que a necessidade de reduzir custos e melhorar a performance de produtos técnicos leva designers e engenheiros a incorporar mais funções em um mesmo componente do produto. Esses requisitos muitas vezes não são alcançados através da aplicação de um material único. Como resultado, surge a necessidade de desenvolvimento de multi-materiais. Produtos multi-materiais são definidos como aqueles que possuem uma associação de materiais dispostos de uma maneira previamente definida, ou seja, mais de um material em um mesmo componente (WARGNIER et al., 2014; KROMM et al., 2007). Como exemplo, pode-se citar os produtos desenvolvidos em múltiplas camadas de diferentes materiais, os compósitos, os co-injetados, co-extrudados etc.

As principais razões para a utilização de multi-materiais, segundo Wargnier et al. (2014), consistem em: melhorar a performance de um componente, integrar mais funções a um material, reduzir os custos operacionais e facilitar a produção, além de evitar partes muito volumosas. Consideradas as vantagens, a utilização de multi-materiais tornou-se comum atualmente. Para citar algumas aplicações em produtos, destaca-se: escova de dente, óculos de sol, lâminas de barbear, painéis automotivos,

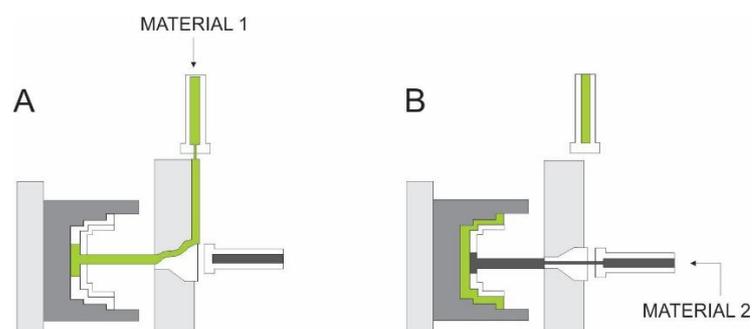
embalagens de alimentos, pegas de ferramentas etc. Algumas dessas aplicações estão representadas na Figura 6.

Figura 6 - Produtos multi-materiais



Yang et al. (2005), que analisam o desenvolvimento de uma escova de dentes multi-material, destacam que há alguns anos a seleção de materiais em produtos de higiene se restringia a questões de saúde. Atualmente, entretanto, as considerações incluem ainda ergonomia e estética. Ou seja, aumentando os requisitos do produto, torna-se mais difícil atingi-los utilizando um único material. Em escala industrial, um dos processos mais utilizados na fabricação desses objetos com mais de um material polimérico no mesmo componente é a chamada co-injeção, ou injeção sanduíche. A co-injeção é um processo no qual dois materiais são injetados simultaneamente ou sequencialmente em um mesmo molde, conforme demonstrado pela Figura 7.

Figura 7 – Processo de co-injeção



Fonte: Adaptado de Chanda e Roy (2007)

O resultado final desse processo é um produto heterogêneo, composto por um “*core material*”, que seria o material principal, e um “*skin material*” (material da superfície, aplicado em menor quantidade) que se fundem (ZAVERL et al., 2013). Kim e Isayev (2015) descrevem que a co-injeção é conhecida desde o início dos anos 70, quando o processo foi desenvolvido. Segundo os autores, a possibilidade de combinar dois polímeros diferentes pode proporcionar propriedades únicas, que não seriam alcançadas através do processo tradicional com uma única injeção.

Esse processo apresenta diversas vantagens técnicas. De acordo com Advani e Hsiao (2012), a co-injeção melhora a qualidade do produto final e reduz os custos e o tempo de produção, uma vez que dispensa o trabalho de montagem. Além disso, as peças podem ser produzidas economicamente em uma única etapa, utilizando apenas uma máquina e um molde, características essas que preenchem os requisitos do *Design for Manufacture and Assembly* (DfMA, ou Design para a fabricação e montagem) (BOOTHROYD; et al., 2011). O DfMA consiste em um conjunto de métodos voltados para tornar mais rápido e eficiente o processo de fabricação e montagem, além de reduzir custos (PLATCHECK, 2012). A sua aplicação passa a ser imprescindível quando se trata de competitividade e qualidade do produto final (ReVELLE, 2002), sendo esse último mais um motivo pelo qual os multi-materiais co-injetados são tão utilizados.

Com uma abordagem voltada para área da engenharia, os autores Kim e Isayev (2015) afirmam que o processo de co-injeção é um dos mais promissores, tanto do ponto de vista econômico, quanto ambiental. Considera-se, entretanto, tal afirmativa controversa. De acordo com os referidos autores, a vantagem ambiental da co-injeção consiste na possibilidade de utilização de reciclados como material principal. Porém, pelo olhar do ecodesign, a co-injeção gera a consolidação de dois materiais distintos, o que dificulta a sua separação e, portanto, inviabiliza a reciclagem por meio do processo tradicional (WORRELL; REUTER, 2014; ALLWOOD; CULLEN, 2012). A reciclagem fica ainda mais comprometida no caso de utilização de dois polímeros imiscíveis na co-injeção, prática que já vem sendo estudada, conforme pesquisa de Gomes, et al. (2011).

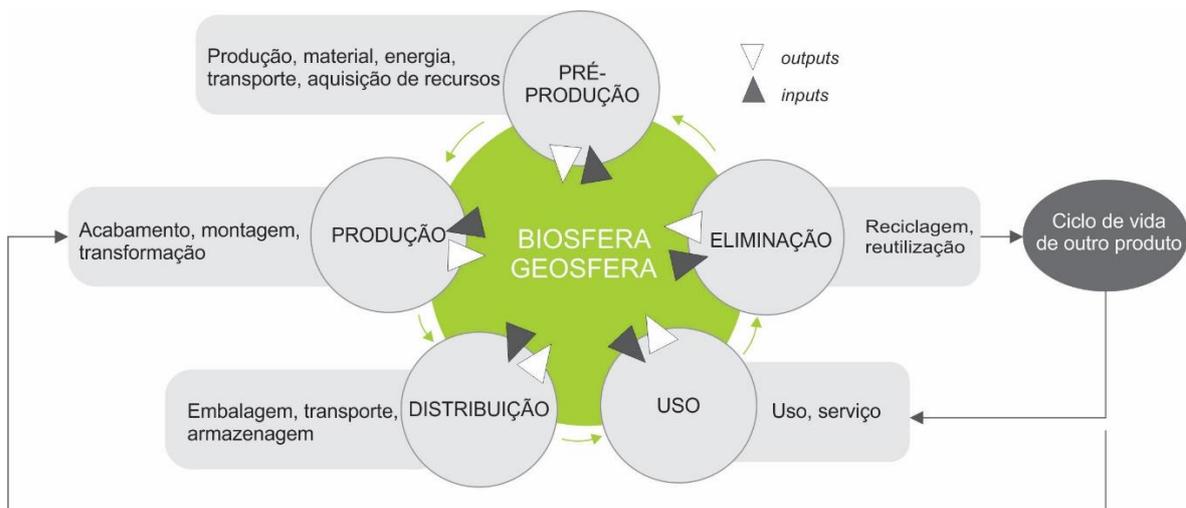
Assim sendo, considera-se essencial a integração DfMA/fim-de-vida, no que tange à possibilidade de concepção de produtos com fundamentos técnicos que possibilitem a vantagem competitiva, sem o comprometimento de questões relacionadas ao fim de vida do produto (ecodesign e DfD, por exemplo). Assim sendo, o tópico

seguinte aborda os principais métodos e conceitos do ecodesign, sua relação com o desenvolvimento de produtos sustentáveis e a situação dos multi-materiais nesse contexto.

3.2.1 Ecodesign e DfD

Paralelamente ao cenário de ampla aplicação de produtos multi-materiais, vive-se um estágio de acentuado desenvolvimento industrial, de aumento populacional e aumento do consumo e descarte de bens (ASSADOURIAN, 2010). Considerando esse contexto, é consolidada na literatura a importância de se abordar requisitos ambientais no design de produto (HALLSTEDT et al., 2013; GAZIULUSOY et al., 2013; SIMÕES et al., 2013; PLATCHECK et al., 2008). Assim sendo, percebe-se a necessidade de aplicação dos princípios do ecodesign no processo de desenvolvimento de produto. De acordo com Manzini e Vezzoli (2002), a aplicação do ecodesign dá-se através da análise do ciclo de vida sistema-produto (Figura 8) e da minimização dos impactos ambientais causados pelo mesmo.

Figura 8 - Ciclo de Vida Sistema-Produto



Fonte: Adaptado de Manzini; Vezzoli, 2002

Nesse contexto, os impactos ambientais são caracterizados pelas trocas que ocorrem entre o meio ambiente e o produto, em cada fase do ciclo de vida. Os autores denominam tais trocas de *inputs* (tudo aquilo que é retirado da natureza para integrar o ciclo do produto, como água, energia, matéria prima etc.) e *outputs* (referente a tudo que é devolvido à natureza em decorrência do ciclo de vida do produto, ou seja, gases, resíduos líquidos e resíduos sólidos).

Conforme demonstra a Figura 8, a última fase do ciclo de vida é a eliminação, que geralmente consiste na disposição em aterro sanitário ou incineração, ou seja, não há um aproveitamento de recurso, o que foi gasto já está perdido. De acordo com Ashby (2001), para alterar esse cenário, é preciso ter uma visão de mais longo prazo (de talvez uns 50 anos), com uma necessária adaptação de estilo de vida que possa atender às necessidades atuais sem comprometer o futuro. Para Ashby, no caso de materiais, a solução da qual mais se escuta falar, mas pouco se vê implementada, ainda é a reciclagem, a possibilidade de “renovar” e a capacidade de fazer mais com menos (ASHBY, 2001).

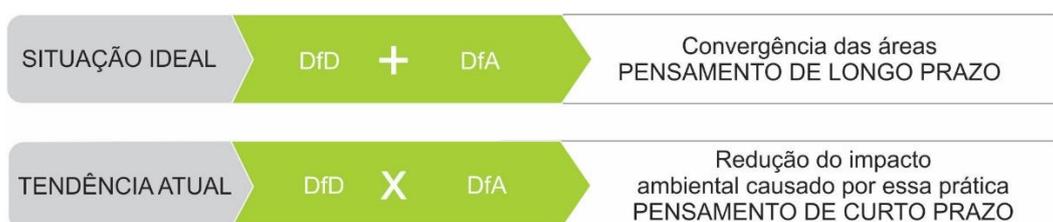
A possibilidade de reciclagem permite o gerenciamento dos materiais em um ciclo fechado. O ciclo fechado, ou anel fechado, como também é chamado, consiste em um planejamento aprofundado do ciclo de vida dos materiais do produtos, para que, através de reciclagem, todos ou grande parte dos materiais sejam recuperados e reinseridos no processo de novos produtos em substituição ao material virgem (MANZINI; VEZZOLI, 2002). Tal situação é considerada ideal, a ponto de influenciar a qualidade de sustentável que alguns materiais recebem. Em muitos casos, a determinação do nível de sustentabilidade de um material não é inerente ao material em si, mas à gestão do seu ciclo de vida. De acordo com Lindahl et al (2014), alguns materiais com boa reputação em termos de sustentabilidade não são gerenciados de forma sustentável e, no sentido inverso, materiais teoricamente não sustentáveis podem ter seus efeitos poluentes reduzidos com uma boa administração do ciclo de vida.

Retomando os princípios do ecodesign, ainda vinculados à reciclagem na fase de eliminação, cabe introduzir o conceito do *Design for Disassembly* (DfD), uma das variáveis do ecodesign. O DfD é conceituado por Favi; et al. (2012): consiste em uma área da metodologia de ecodesign que permite a rápida e eficiente desmontagem das partes, componentes e materiais de um produto. É relevante destacar que o DfD toma uma posição estratégica importante na redução da geração de resíduos sólidos, já que tem influência na etapa de uso – podendo prolongar a vida útil do produto através da manutenção/desmontagem e substituição de peças, e evidentemente, na fase de eliminação, sendo essencial para possibilitar a reciclagem ou reutilização das partes do produto (GIUDICE; et al., 2006). Em complemento, Worrell e Reuter (2014) atentam para o fato de que a possibilidade de reciclagem está fortemente relacionada à capacidade de liberação e separação dos materiais. Por esse motivo, surge a

preocupação em relação a produtos complexos, como os multi-materiais. Nesses casos, a separação dos materiais depende de uma rede de diferentes tipos de processos, muitas vezes ineficientes e de custo elevado.

Sabe-se, entretanto, que a aplicação do ecodesign e do DfD não é contemplada nos projetos multi-materiais. Resumindo o raciocínio desenvolvido ao longo dos tópicos anteriores, a situação atual do desenvolvimento de produtos está bastante vinculada a preceitos técnicos do ponto de vista da produção e competitividade. Essa situação se verifica especialmente na tendência de aplicação do DfA (*Design for Assembly*, ou Design para a Montagem) através da moldagem por co-injeção em produtos multi-materiais. Nesse sentido, discute-se, como a situação ideal, o estreitamento entre as áreas da engenharia e do design no desenvolvimento de produtos com requisitos técnicos (DfA) em concordância com o projeto de ecodesign voltado para o DfD. Conforme descrito na Figura 9, essa é considerada uma solução ideal e complexa, que apenas poderá ser implementada, em níveis satisfatórios, no longo prazo. Assim, faz-se necessária a adoção de medidas urgentes para a solução a curto e médio prazos dos problemas ocasionados pela grande concentração de resíduos poliméricos multi-materiais. É nessas soluções de curto e médio prazos que a presente pesquisa se insere, apresentando como um possível caminho para a redução do descarte de resíduos poliméricos multi-materiais a reciclagem de multi-materiais poliméricos, sem a necessidade de separação dos materiais.

Figura 9 - Situação ideal e tendência atual de desenvolvimento de produtos

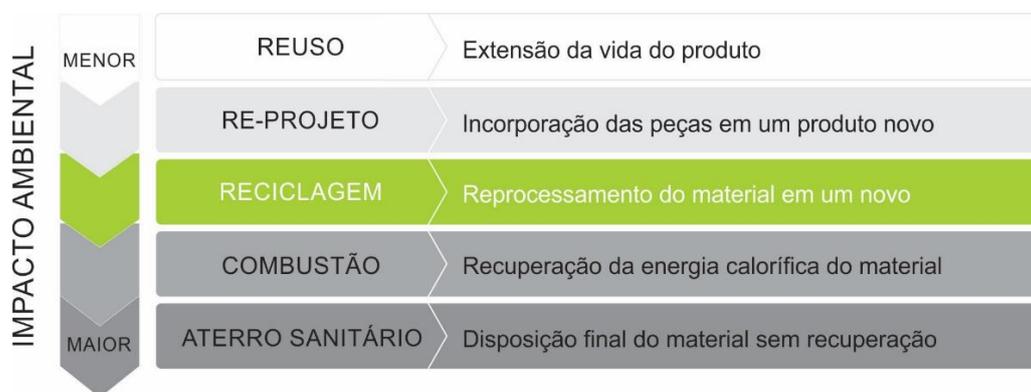


Desse modo, apresenta-se no capítulo seguinte um panorama referente à reciclagem tradicional de materiais poliméricos e possíveis perspectivas para a reciclagem de multi-materiais.

3.3 RECICLAGEM DE MATERIAIS POLIMÉRICOS: IMPORTÂNCIA E CONTEXTO ATUAL

Estima-se um aumento do uso de materiais poliméricos em diversos produtos nos próximos anos, e conseqüentemente, o aumento da geração de resíduos sólidos plásticos. Diante deste cenário, grande parte da comunidade científica (NKWACHUKWU et al., 2013; RAJENDRAN et al., 2012; HOPEWELL et al., 2009; KOUSHAL et al., 2014; WORRELL; REUTER, 2014) considera a reciclagem como a melhor opção no gerenciamento dos resíduos poliméricos. De acordo com o software CES Selector (2013), ferramenta desenvolvida por Ashby e utilizada para seleção de materiais, a qualidade de reciclável de um material indica que o mesmo pode ser reprocessado e transformado em outro, de qualidade semelhante. Tal reprocessamento deve ser possível através de métodos acessíveis e economicamente viáveis (CES SELECTOR, 2013). Em relação ao impacto ambiental das opções de fim de vida dos materiais, o software CES Selector (2013) fornece um ranking das opções mais benéficas do ponto de vista ambiental (Figura 10). Percebe-se que a reciclagem é uma boa opção quanto ao impacto ambiental gerado pelo fim de vida dos materiais, mas é importante que sua aplicação seja posterior ao reuso e ao re-projeto, quando possível.

Figura 10 - Opções de gerenciamento de materiais no fim de vida do produto



Fonte: Adaptado de CES, 2013

Pinto (2012) conceitua reciclagem como “todos os possíveis usos de um material, uma vez terminada a vida útil da aplicação pretendida para a peça ou material considerado (PINTO, 2012 p. 16)”. Nesse ponto se destaca a posição de Cândido et al. (2011) que vai além, enfocando a importância do estudo dos ciclos de reciclagem dos materiais. O conhecimento a respeito da vida útil dos materiais após diversos ciclos de

reciclagem é importante, pois o mesmo auxilia no processo de seleção de materiais sustentáveis e no seu gerenciamento em ciclo fechado (CÂNDIDO et al., 2011).

De acordo com Nkwachukwu, et al. (2013), o aumento das atividades de reciclagem ocorre devido ao amplo apelo público que existe em relação às mesmas, além dos comprovados benefícios ambientais. Tais benefícios são enumerados por Rajendran et al. (2012): consistem na redução do consumo de energia e da emissão de gás carbônico, já que a reciclagem evita o processo de extração de petróleo e a transformação do polímero (sendo a segunda uma etapa que consome em média 95% da energia total do processo). Além disso, a reciclagem promove a redução dos volumes enviados a aterro sanitário. Também Hopewell et al. (2009) associam a reciclagem à redução na extração e no consumo de petróleo.

A importância da ampliação das práticas de reciclagem e do melhor gerenciamento de resíduos não são reconhecidos apenas no âmbito científico, são estimulados na prática por políticas públicas. No Brasil, existe uma relevante pressão legal para promover o gerenciamento de resíduos sólidos através de práticas de logística reversa, ecodesign, reciclagem etc. Trata-se da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei 12.305/10. Os objetivos da PNRS são elencados em seu artigo 7º. Destacam-se aqui os incisos II e XI que definem: “a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos” e o “incentivo à indústria da reciclagem, tendo em vista fomentar o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados”, respectivamente.

Considerada a ênfase da PNRS para as questões de reciclagem, Campos (2014) destaca outro aspecto relevante da lei: as cidades ficam obrigadas a depositar em aterro sanitário apenas o rejeito do tratamento de resíduos, ou seja, os processos de reciclagem e recuperação de materiais devem ser esgotados, sendo a disposição em aterro sanitário o último estágio. Campos (2014) conclui que tal determinação implica no desenvolvimento de processos de recuperação de materiais mais adequados a cada tipo de produto, reduzindo ao máximo o volume destinado a aterros. Sendo assim, Jabbour et al. (2014) destacam que, além de representar um relevante estímulo a expansão da reciclagem, a instituição da PNRS pode resultar em oportunidades de inovação tecnológica, tanto na área social como econômica.

Cabe destacar ainda outro fator que influencia a indústria da reciclagem. De acordo com Murakami (2014), a reciclagem pode ser estimulada ainda por pressões de mercado e vantagens econômicas. Na mesma linha de pensamento, Goodship (2007) explica a inter-relação que deve ser observada no exame das atividades de reciclagem: trata-se da ligação entre pressão ambiental, legislação e forças de mercado (Figura 11).

Figura 11 - Inter-relação (1) que influencia a atividade de reciclagem



Fonte: Adaptado de Goodship, 2007.

A autora explica que o polímero reciclado compete com o virgem, e a vantagem de utilização de um sobre o outro depende, basicamente, de duas variáveis: o preço do material virgem e a qualidade do material reprocessado. O preço do material virgem oscila muito, devido às demandas do mercado e o custo do petróleo, portanto, o valor e a competitividade do reciclado variam também. Assim sendo, a pressão ambiental é importante por criar uma maior demanda de polímero reciclado, fortalecendo o mercado e, ao mesmo tempo, incentivando a criação de legislação nessa área. A regulamentação, por sua vez, também funciona como uma geradora de oportunidades para o crescimento do mercado e a formalização da pressão ambiental.

Destacados a importância e o contexto atual da reciclagem em diferentes esferas, cabe examinar os processos tradicionalmente utilizados para o reprocessamento de polímeros, assunto que será abordado nos tópicos que seguem.

3.3.1 Processos tradicionais de reciclagem de polímeros

Para uma abordagem mais didática, Antunes (2007) propõe uma classificação das principais formas de reciclagem. A mesma é apresentada na Figura 12.

Figura 12 - Classificação tipos de reciclagem



Fonte: Elaborado com base em ANTUNES, 2007.

O esquema ilustrado na Figura 12 demonstra que a reciclagem pode ser subdividida em quatro variações: primária, secundária, terciária e quaternária. Antunes (2007) explica que a reciclagem primária é aquela realizada nos resíduos provenientes do pré-consumo, ou seja, aqueles gerados durante a fabricação de um produto. Na reciclagem primária, a recuperação do material é realizada na própria fábrica. Já a reciclagem secundária é aquela que reprocessa materiais oriundos do pós-consumo, nesse caso é necessário que se faça uma coleta seletiva do lixo seguida de uma triagem e separação (FERREIRA, 2007). Em ambos os casos (reciclagem primária e secundária), o tipo de processo aplicado é o da reciclagem mecânica.

A reciclagem terciária é indicada para produtos com alto valor econômico, nesse caso é realizada a reciclagem química (ANTUNES, 2007). Por fim, a reciclagem quaternária é mais aplicada em resíduos sólidos não-reutilizáveis economicamente, o processo utilizado nesses resíduos é a recuperação energética (ANTUNES, 2007). Os tipos de reciclagem mecânica, química e recuperação energética são descritos a seguir.

3.3.1.1 Reciclagem Mecânica

A reciclagem mecânica, também conhecida como reciclagem física, é a mais utilizada atualmente. Nesse processo, o polímero é triturado e reprocessado para produzir um novo componente (GOODSHIP, 2007). A reciclagem mecânica depende de diversas etapas e procedimentos. Essas etapas estão ilustradas na Figura 13.

Figura 13 - Fases da reciclagem mecânica



Fonte: Elaborado com base em AGUADO; SERRANO, 1999.

A primeira fase da reciclagem mecânica consiste na separação dos materiais. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabelece, a partir da NBR 13.230:2008, normas para a correta identificação dos materiais (Figura 14).

Figura 14 - Simbologia para identificação de materiais poliméricos



PET: Poli(tereftalato de etileno); PEAD: Polietileno de alta densidade; PVC: Poli(cloreto de vinila); PEBD: Polietileno de baixa densidade; PP Polipropileno; PS: Poliestireno.

Fonte: Adaptado de NBR 13230:2008

Nesse sentido, conforme destacado nos capítulos anteriores, a reciclagem mecânica é limitada pela incompatibilidade entre diferentes tipos de polímeros, o que torna importante a separação cuidadosa dos materiais (AGUADO; SERRANO, 1999). A etapa seguinte consiste na lavagem dos resíduos separados, Worrell e Reuter (2014) descrevem que nem todos os materiais necessitam passar por essa etapa. No caso da reciclagem primária (na qual o material reprocessado é do pré-consumo), por exemplo, a lavagem não é necessária.

A etapa seguinte consiste na trituração, ou seja, a redução do tamanho dos resíduos. O triturador de polímeros consiste em lâminas giratórias movidas por energia elétrica, uma peneira (que regula o tamanho das partículas finais do material) e uma caixa coletora para evitar que o material triturado se espalhe (WORRELL; REUTER, 2014). A trituração é seguida dos processos de extrusão e injeção. A extrusão é o processo mais comum utilizado na reciclagem. A partir dela, o material é transformado em pellets (formato semelhante a grãos) que é ideal para o processo seguinte de injeção (WORRELL; REUTER, 2014). Por fim, a injeção dos pellets gerados na extrusão transforma o material em um produto final. Worrell e Reuter (2014) explicam que o material é aquecido e direcionado em alta pressão para dentro de um molde. Após o resfriamento, o molde é aberto, e a peça final é retirada.

3.3.1.2 Reciclagem Química

Algumas das limitações da reciclagem mecânica acabam tornando a reciclagem química uma opção mais viável tecnicamente. O processo consiste na decomposição do polímero através de calor ou agentes químicos até a obtenção de monômeros ou

misturas de compostos, principalmente hidrocarbonetos (AGUADO; SERRANO, 1999).

Aguado e Serrano (1999) destacam que o produto derivado da reciclagem química possui características e propriedades semelhantes às do material virgem. Apesar de apresentar potencial e despertar interesse dos recicladores, a reciclagem química ainda é uma opção pouco aplicada (MORSELLI et al., 2009). A principal razão pelo seu reduzido índice de aplicação é o baixo retorno financeiro do processo. Nesse sentido, Morselli et al. (2009) explicam que a implementação da reciclagem química requer um alto investimento. Além disso, as variações do preço do barril de petróleo, que representam uma instabilidade econômica para o setor, seguram o investimento em tecnologias mais onerosas, limitando a vasta aplicação dessa técnica (GOODSHIP, 2007; MORSELI et al., 2009).

3.3.1.3 Recuperação Energética

Na recuperação energética, o material é incinerado, a energia térmica liberada durante o processo é recuperada e convertida em outras formas de energia (GOODSHIP, 2007). Por esse motivo, o processo é também conhecido por reciclagem térmica (PILATO, 2010). Uma das restrições da recuperação energética é a necessidade de separação de polímeros que liberam substâncias tóxicas durante a queima, como o PVC, por exemplo (JIMÉNEZ et al., 2015). Assim sendo, a identificação correta dos polímeros, destacada por Antunes (2007), também representa um fator de grande importância para a eficiência da recuperação energética. Apesar de a recuperação energética constituir uma forma de aproveitamento a partir de material descartado, Pilato (2010) afirma que nem todas as classificações a consideram como uma forma de reciclagem, já que o material em si não é reutilizado, apenas a energia obtida com a sua queima.

3.3.2 Reciclagem de produtos poliméricos multi-materiais

Apesar da existência de incentivos para práticas de reciclagem, a grande maioria dos produtos ainda são desenvolvidos em desacordo com os conceitos de ecodesign ou planejamentos de DfD, o que dificulta o reprocessamento. É o caso dos multi-materiais, cuja reciclagem mecânica é dificultada devido à complexidade de separação dos materiais. E os demais métodos de reciclagem, conforme descrito nos tópicos antecedentes, muitas vezes se tornam onerosos e pouco eficientes.

Essa situação acarreta o acúmulo de resíduos sólidos em aterros sanitários. Não obstante, esse tipo de disposição apresenta algumas questões que merecem uma análise crítica. Inicialmente, a medida que o volume de resíduos sólidos gerados aumenta, diminui a capacidade dos aterros. Esses depósitos necessitam de uma extensa área física, o que limita a construção de novos aterros (KOLLIKKATHARA et al., 2010). Da mesma maneira, a inexistência de gerenciamento acaba levando a um tipo de descarte ainda mais prejudicial: o descarte ilegal em locais inadequados como rios, ruas, áreas verdes etc. (ICHINOSE; YAMAMOTO, 2011). Assim sendo, a impossibilidade de reprocessamento de materiais poliméricos culmina no acúmulo de resíduos sólidos. Esse contexto traz consequências que atingem esferas ambientais, sociais e econômicas.

Aguado e Serrano (1999) destacam os principais impactos ambientais causados pelos resíduos poliméricos. Inicialmente, o tempo prolongado de decomposição faz com que esses materiais ocupem espaço por muito tempo em aterros sanitários, esgotando a capacidade dos mesmos. Outro problema é relativo ao risco de incêndios acidentais com altos índices de emissão de gases poluentes, pois nos casos em que há muito material polimérico no aterro sanitário esse risco aumenta. Além disso, alguns polímeros são frequentemente complementados com aditivos como cargas, plastificantes, pigmentos etc. Esses aditivos podem conter metais tóxicos, substâncias extremamente prejudiciais ao meio ambiente e à saúde da população (AGUADO; SERRANO, 1999).

Apesar do cenário crítico apresentado, há chances de reverter essa situação. Hopewell et al. (2009) consideram possível converter a maioria dos resíduos plásticos de aterros sanitários para reciclagem nas próximas décadas. De acordo com os autores, os avanços em tecnologia e sistemas de coleta, triagem e reciclagem estão criando novas oportunidades para a reciclagem.

Nesse sentido, Jiménez et al. (2015) contrapõem argumentando que, apesar do aumento da reciclagem de polímeros e do surgimento de novas alternativas para o fim de vida dos mesmos, importantes esforços ainda são necessários para se alcançar a eficiência na reciclagem. Isso se deve às limitações dos processos existentes, em especial da necessidade de separação e identificação dos materiais para a reciclagem mecânica (ANTUNES, 2007), o alto custo da reciclagem química (MORSELLI, et al., 2009) e a necessidade de extração de substâncias tóxicas na recuperação energética (JIMÉNEZ et al., 2015).

Considerando a necessidade de se expandir as práticas de reciclagem, especialmente de polímeros misturados (como é o caso dos co-injetados), essa pesquisa propõe o reprocessamento de multi-materiais poliméricos sem a prévia separação dos materiais. Isso resultaria em um menor custo do processo de reciclagem, tornando o reprocessamento de polímeros misturados mais rentável (BERTIN; ROBIN, 2002; NAJAFI et al., 2006). Nesse sentido, na área de compósitos existem estudos que buscam promover a reciclagem de compósitos de base polimérica por diversos métodos (PERRY et al., 2012; PALMER et al., 2009; PICKERING, 2006; YIP et al., 2002). Entretanto, poucos estudos tratam da reciclagem de multi-materiais poliméricos ou polímeros misturados.

Alguns autores sugerem a aplicação de pirólise para promover a reciclagem de polímeros misturados (KAMINSKY, 1995; KAMINSKY; KIM, 1999). De acordo com Hopewell et al. (2009), a incineração com recuperação energética é indicada como a técnica mais adequada para o fim-de-vida de polímeros misturados de difícil separação. Entretanto, de acordo com o *UK Waste Resource Action Programme* (WRAP, 2008), a incineração tem a segunda pior performance considerando impactos ambientais, sendo apenas melhor do que a disposição em aterro sanitário. Apesar disso, o descarte em aterro sanitário segue sendo a opção mais comum de fim de vida de multi-materiais poliméricos. A pesquisa que analisou o ciclo de vida de componentes multi-materiais utilizados na indústria automotiva (RIBEIRO et al., 2007) demonstra o problema associado ao fim de vida dos co-injetados e a importância de se buscar soluções para a reciclagem dos mesmos. De acordo com o estudo, que comparou o ciclo de vida de uma peça utilizada atualmente (montada manualmente) com uma peça de um cenário alternativo (produzida por co-injeção), a peça de referência gera mais resíduos e gasta mais energia para ser produzida do que a peça do cenário alternativo. Entretanto, a peça alternativa (co-injetada) gera mais resíduos sólidos no fim de vida do que a peça montada manualmente. Os materiais poliméricos que chegam ao fim de vida são descartados em aterro sanitário em ambos os cenários (RIBEIRO et al., 2007).

Um exemplo de estudo que efetivamente reprocessou e reaplicou polímeros misturados é a pesquisa desenvolvida por Cavalieri e Padella (2002). O referido estudo utilizou um processo de moagem de polímeros com CO₂ líquido em resíduos de polímeros misturados, o que resultou em um material em pó utilizado como matriz em um novo compósito (CAVALIERI; PRADELLA, 2002). Nesse sentido, considerando a

possibilidade promover a reciclagem de polímeros misturados, tem-se a preocupação de avaliar as propriedades do material reciclado resultante. O cuidado se justifica pois geralmente polímeros reciclados apresentam perda de performance mecânica devido à degradações sofridas ao longo dos ciclos de reciclagem, o que pode comprometer sua aplicação na mesma função do produto inicial (LORENZO et al., 2014; MOELLER, 2008). Além disso, existe ainda a preocupação com relação à adesão interfacial da blenda final da reciclagem de multi-materiais poliméricos, o que pode comprometer a performance mecânica do material final (FU et al., 2008). Nesse sentido, grande parte dos polímeros misturados reciclados acabam em aplicações de baixo valor agregado, em forma de carga. Essa prática é comum na fabricação de asfalto (REZENDE E CARVALHO, 2003; AKBULUT E GÜRER, 2007; HUANG et al., 2007; CHIU et al., 2008) e concreto (ISAMAIL; AL-HASHMI, 2008; RAO et al., 2007; KATZ, 2003), por exemplo. Esse tipo de aplicação final muitas vezes não aproveita todo o potencial oferecido pelo material.

Apesar disso, estudos demonstram a viabilidade de se obter um material com características mecânicas satisfatórias, mesmo partindo de polímeros misturados reciclados. Um estudo que avaliou as propriedades mecânicas de um compósito de serragem com polímeros misturados reciclados (polietileno de alta densidade e polipropileno) demonstrou que as amostras contendo polímeros misturados reciclados eram estatisticamente comparáveis com as dos compósitos preparados com polímeros virgens (NAJAFI et al., 2006). Outro estudo (BERTIN; ROBIN, 2002) que analisou a reciclagem de resíduos de polímeros misturados (compostos por uma matriz de polietileno de baixa densidade e polipropileno) demonstrou que a adição de agentes compatibilizantes melhoraram a performance mecânica do material final.

No presente estudo, apresenta-se a hipótese de se promover a reciclagem de multi-materiais poliméricos através da cominuição das partículas do material (por micronização). Com base na revisão de literatura que se apresenta, acredita-se que seja possível obter um material final com propriedades satisfatórias para a aplicação em novos produtos com valor agregado.

3.3.3 Cominuição das partículas do material por micronização

A micronização é um processo utilizado para redução (cominuição) do tamanho das partículas de um material (VANDANA; et al., 2014). Existem diferentes técnicas de

micronização, sendo as mais comuns e acessíveis as que envolvem trituração. De acordo com Lagarinhos e Tenório (2008), a micronização por trituração pode ocorrer à temperatura ambiente ou por criogenia (também chamada de micronização criogênica).

A micronização criogênica consiste no resfriamento do material com nitrogênio líquido, seguido de granulação (LAGARINHOS; TENÓRIO, 2008). A temperatura do processo se mantém entre -80°C e -120°C (SHULMAN, 2004). Esse tipo de micronização apresenta baixo custo de manutenção e consumo de energia. Entretanto, o custo operacional é alto, em função do consumo do nitrogênio líquido (LAGARINHOS; TENÓRIO, 2008). Na micronização criogênica, é possível reduzir as partículas do material a granulometrias de até 0,105mm (AYYER et al., 2013).

No Brasil, a micronização à temperatura ambiente é a mais utilizada, Esse processo requer equipamentos mais robustos do que a criogênica e opera em temperaturas que chegam a 120°C , por isso não é indicado para materiais com baixo ponto de fusão (LAGARINHOS; TENÓRIO, 2008). Nesse tipo de processo, o material é triturado em um moinho de facas (SHULMAN, 2004). De acordo com Ayer et al. (2013), a micronização a temperatura ambiente tem capacidade de gerar partículas de aproximadamente 0,4mm, com poucas partículas mais finas. Já Lagarinhos e Tenório (2008) descrevem que, nesse tipo de micronização, o tamanho final das partículas seria de até 0,21mm, aproximadamente. A Tabela 1 ilustra as faixas de granulometria que caracterizam, aproximadamente, os dois tipos de micronização.

Tabela 1 - Granulometria do material micronizado

Processo	Tamanho (mm)
Micronização a temp. ambiente	0,420 - 0,210
Micronização criogênica	0,210 – 0,105

Fonte: Elaborado com base em Ayer (2013); Lagarinhos e Tenório (2008)

Ainda em relação ao tamanho das partículas geradas, Shulman (2004) lembra que tanto a micronização a temperatura ambiente como a criogênica podem ser aplicadas diversas vezes ao mesmo material, até que as partículas atinjam a granulometria necessária.

Em relação às aplicações mais comuns da micronização, cabe citar a sua ampla utilização na área da farmácia para fabricação de medicamentos. As substâncias em pó (micronizadas) proporcionam uma taxa de dissolução mais alta das partículas de

fármacos, bioviabilizando seu consumo via oral (VANDANA et al., 2014; JOSHI, 2011). No caso das aplicações farmacêuticas, as granulometrias necessárias são em torno de 10 microns, ou 0,01mm (VANDANA et al., 2014). Por isso, nesses casos, não são utilizadas as micronizações à temperatura ambiente e criogênica, mas métodos mais complexos, tais como micronização *in-situ* (VANDANA et al., 2014), micronização *spiral jet mil* (JOSHI, 2011), micronização por fluídos supercríticos (REVERCHON et al., 2015) etc.

Outra aplicação interessante da micronização é no processamento de fibras naturais. Algumas pesquisas (HUANG et al., 2014; FERNANDES et al., 2008; FORNARI JR. et al., 2008) estudaram a aplicação da micronização em fibras naturais para desenvolvimento de materiais compósitos. De acordo com Fornari Jr. et al. (2008), nesses casos, o processo de micronização é importante por garantir a homogeneidade da mistura, melhorando as propriedades do material final.

Especificamente na área da reciclagem, uma das aplicações mais comuns do processo de micronização tem relação com o reprocessamento de borracha de pneus pós-consumo. Isso se deve ao fato de o material não ser passível de reciclagem pelos processos tradicionais, já que se trata de um polímero termofixo (ZHANG et al., 2009). Nesse caso, a conversão do material em pó e posterior mistura com polímero termoplástico resulta na criação de um elastômero termoplástico passível de injeção, extrusão e outros processos (ZHANG et al., 2009). Diversos estudos (ZHANG et al., 2009; COLOM et al., 2007; SONNIER et al., 2008; AYYER et al., 2013) foram conduzidos abordando aspectos da aplicação de micronização na recuperação de borracha de pneus e posterior processamento com outros polímeros. Os resultados demonstram que a técnica é viável.

A utilização de micronização com o objetivo de possibilitar ou facilitar a reciclagem já começa a ser estudada em outras áreas e materiais além da borracha de pneus. Na área de engenharia civil, por exemplo, a micronização foi aplicada na reciclagem de barita, um mineral utilizado na fabricação de argamassa (STARK et al., 2014). No mesmo sentido, o estudo de Prameettha e Bhartkumar (2014) demonstrou a aplicação de sílica (derivada da casca de arroz) micronizada como carga para concreto reciclado. O resultado demonstrou que o concreto reciclado com o material micronizado apresentou propriedades semelhantes ao concreto virgem (PRAMEETTHA;

BHARATKUMAR, 2014). Outro estudo (CASA; CASTRO, 2014) reciclou cinzas de biomassa por micronização para aplicação em tijolos. A micronização foi utilizada também para a reciclagem da lama drenada de minas de carvão e posterior desenvolvimento de pigmento com o material resultante (MARCELLO, 2008).

No que diz respeito à micronização para reciclagem de polímeros, Mao et al. (2014) estudou a influência do tamanho das partículas micronizadas na reciclagem de poliuretano para aplicação em aglomerado. A micronização foi aplicada ainda na reciclagem do elastômero EPDM por Jeong et al. (2014) e Hong et al. (2015). Por fim, Basire (2013) desenvolveu um processo para reciclagem de poliamida, proveniente de *airbags*, através da micronização (BASIRE, 2013).

3.4 POLÍMEROS

Conforme abordado nos capítulos iniciais, os polímeros tiveram ampla utilização a partir da Segunda Guerra Mundial, e desde então, exerceram grande influência no design, nos processos de fabricação e até nos padrões de consumo. O presente capítulo aborda alguns conceitos introdutórios e informações técnicas pertinentes a respeito dos materiais poliméricos.

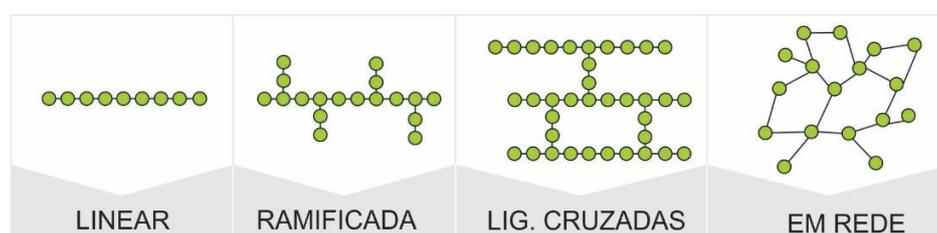
A palavra plástico tem origem etimológica do grego *plastikos*, cujo significado é modelável. Da mesma forma, o termo polímero também tem origem do grego, significando muitas partes (PAINTER; COLEMAN, 2009). Tal significado atribuído à palavra polímero tem relação com a sua estrutura molecular. A estrutura molecular dos polímeros é gigantesca, por isso é chamada de macromolécula. Cada macromolécula é formada por unidades repetidas (chamadas de meros), que, como o nome sugere, se repetem sucessivamente ao longo da cadeia (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Assim sendo, Young e Lovell (2011) conceituam polímero como uma substância composta por moléculas com longas sequências de um ou mais tipos de átomos ou grupos de átomos unidos entre si, na maioria das vezes por ligações covalentes. No mesmo sentido, Canevarolo Jr. (2006) apresenta o conceito mais completo de polímero:

“Polímero – material orgânico (ou inorgânico) de alta massa molar, cuja estrutura consiste na repetição de pequenas unidades (meros). Macromolécula formada pela união de moléculas simples ligadas por ligação covalente (CANEVAROLO JR., 2006, p. 23)”

São quatro as possíveis estruturas moleculares que as cadeias poliméricas apresentam: linear, ramificada, cruzada e em rede (CALLISTER; RETHWISCH, 2012), conforme representado na Figura 15. As diferentes estruturas moleculares dos polímeros são importantes, pois, assim como a massa molar e a forma, têm relação com as propriedades físicas dos polímeros (CALLISTER; RETHWISCH, 2012). De acordo com Mano e Mendes (1999), as diferentes propriedades apresentadas pelos polímeros, em decorrência de cada tipo de cadeia, têm especial ligação com a fusibilidade e a solubilidade.

Figura 15 - Estruturas moleculares dos polímeros



Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch (2012)

Em termos de classificação de polímeros, a mais comum consiste em: termofixos, termoplásticos e elastômeros (YOUNG; LOVELL, 2011). De acordo com Callister e Rethwisch (2012), termofixos e termoplásticos têm relação com o comportamento em temperaturas elevadas. Os termoplásticos, geralmente aqueles que possuem estruturas lineares ou algumas estruturas ramificadas com cadeias flexíveis, amolecem com a elevação da temperatura e ficam rígidos quando resfriados. Tal processo é reversível e passível de repetição (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Já os termofixos enrijecem durante a sua formação e não amolecem sob aquecimento. Esse tipo de polímero tem estrutura em rede, eles são, geralmente, mais duros e resistentes que os termoplásticos (CALLISTER; RETHWISCH, 2012). Os elastômeros (borrachas), por sua vez, são polímeros de ligações cruzadas, sua principal característica é a capacidade de se alongar facilmente e retornar à posição original quando a tensão é aliviada (YOUNG; LOVELL, 2011).

Pelo olhar do design de produto e seleção de materiais, é interessante destacar ainda a classificação dos polímeros em termos de sua aplicação principal. Ferrante e Walter (2010) dividem os materiais poliméricos em 4 tipos: polímeros comuns (*commodities*), polímeros de engenharia, polímeros de alto desempenho e polímeros de altíssimo desempenho.

Os polímeros comuns são os mais consumidos mundialmente, suas principais características são o baixo custo, facilidade de processamento e propriedades razoáveis. Os polímeros de engenharia, por sua vez, possuem propriedades mecânicas elevadas e podem ser relativamente caros, representando aproximadamente 15% do mercado de polímeros (FERRANTE; WALTER, 2010). Quando os requisitos em relação às propriedades dos polímeros são ainda mais exigentes, é necessário buscar polímeros de alto desempenho, cujo principal exemplo é a poliamida (FERRANTE; WALTER, 2010). Por fim, Ferrante e Walter (2010) descrevem que os polímeros de altíssimo desempenho são aqueles com as melhores propriedades mecânicas, físicas e térmicas.

Compreendidas as diferenças entre alguns polímeros, é importante salientar que tais diferenças geram distintas propriedades. Assim sendo, devido a propriedades específicas que muitos polímeros apresentam, não raras vezes, os mesmos são aplicados em formas de blendas, com o objetivo de obter propriedades mais interessantes (FERRANTE; WALTER, 2010).

Nesse sentido, Sperling (2006) define que material polimérico multicomponente consiste em blenda, compósito ou uma combinação de ambos. A conceituação mais ampla de blenda é a combinação de dois ou mais polímeros, já o compósito contém um material polimérico e outro não polimérico (SPERLING, 2006). Apresentados os conceitos gerais a respeito dos polímeros, são destacadas a seguir as principais características dos polímeros utilizados nesse estudo.

3.4.1 Polietileno – PE

O Polietileno (PE) é um polímero termoplástico de coloração esbranquiçada translúcida, entretanto, é possível obter produtos coloridos com o uso de corantes. Ferrante e Walter (2010) classificam o PE como um polímero comum, ou *commodity*. Assim sendo, Smith e Hashemi (2012) justificam que o PE é o polímero mais utilizado mundialmente devido ao seu baixo custo e a suas principais propriedades industriais. Tais propriedades incluem: tenacidade, boa flexibilidade, resistência à corrosão, excelentes propriedades de isolamento e é inodoro. O polímero polietileno está representado na Figura 16.

Figura 16 - Representação do Polietileno



Fonte: Adaptado de Smith e Hashemi (2012)

Existem basicamente dois tipos de PE: polietileno de baixa densidade (PEBD) e polietileno de alta densidade (PEAD), surgidos nos anos 1939 e 1956, respectivamente (SMITH; HASHEMI, 2012). A principal diferença entre eles é a sua estrutura molecular, já que o PEBD possui cadeia ramificada e o PEAD, cadeia linear (Figura 17). De acordo com Smith e Hashemi (2012), foi apenas por volta de 1976 que um novo processo permitiu a criação de um polietileno de baixa densidade linear (PEDBL), que possui uma cadeia linear com curtos e oblíquos ramos laterais, conforme demonstrado na Figura 17.

Figura 17 - Cadeias do PEAD, PEBD e PEBDL



Fonte: Adaptado de Smith e Hashemi (2012)

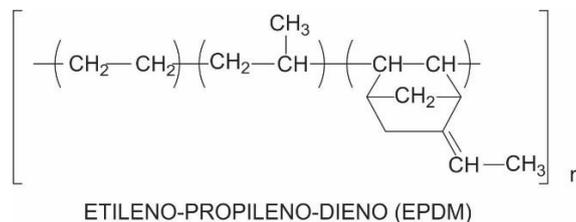
O PE utilizado nessa pesquisa é o PEDBL, cujas principais aplicações incluem: brinquedos, garrafas, filmes para embalagens, recapeamento de fios etc. (CES SELECTOR, 2013).

3.4.2 Etileno-propileno-dieno – EPDM

O etileno-propileno-dieno (EPDM) é classificado como um termoplástico elastômero (CIESIELSKI, 1999), o mesmo está representado na Figura 18. Esse material já era comercializado na década de 60, seu uso teve um grande aumento ao longo dos anos devido ao bom balanço de suas propriedades, que incluem resistência ao calor e alta resiliência (HARPER; PETRIE, 2003). Além disso, Harper e Petrie (2003) lembram que o EPDM também tem a capacidade de receber grandes quantidades de cargas, aditivos e plastificantes. Apresenta ainda boa resistência química à água, ozônio

e radiação (CIESIELSKI, 1999). Quanto à sua resistência à água, o EPDM é considerado pelo Software de seleção de materiais CES Selector (2013) como a borracha de maior resistência à água.

Figura 18 - Representação do etileno-propileno-dieno



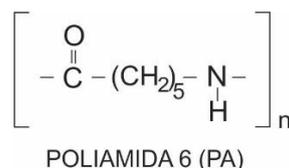
Fonte: Adaptado de Ciesielski (1999)

As aplicações do EPDM incluem vedações automotivas (borracha de EPDM moldada é utilizada no para-choque e em enchimentos que reduzem a vibração ao redor do veículo), tubulações, coberturas/telhados, pneus e outras aplicações domésticas (HONG et al., 2015). Além disso, o material é cada vez mais popular para uso em voltagens médias, sendo utilizado em fios e revestimento para cabos (HARPER; PETRIE, 2003). Em relação ao impacto ambiental, o EPDM é considerado como material não reciclável pelo software CES Selector (2013), apesar disso, alguns estudos (HONG et al, 2015; JEONG et al., 2014) já apresentam formas de reciclagem desse material. Ambas utilizam o processo de micronização para possibilitar o reprocessamento do resíduo de EPDM.

3.4.3 Poliamida – PA

A poliamida (representada na Figura 19) é considerada um polímero de alto desempenho por Ferrante e Walter (2010); Mano e Mendes (1999) a classifica como um polímero de engenharia.

Figura 19 - Representação da poliamida 6



Fonte: Adaptado de Mano e Mendes (1999)

De acordo com Ashby e Johnson (2002), a poliamida é forte, resistente e tem baixo índice de fricção. Além de apresentar boas propriedades em variadas temperaturas (de -80°C até 120°C). Mano e Mendes (1999) complementam que a PA possui ainda

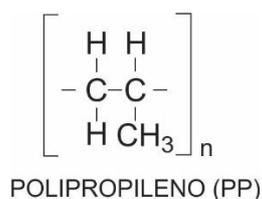
boa resistência química e a solventes não ácidos, além de boa resistência mecânica à fadiga, a impacto repetido e à abrasão.

Suas aplicações são das mais variadas: buchas, equipamentos elétricos, lentes, tubulações, cadeiras, cerdas de escovas de dente, cordas, roupas de segurança etc. (ASHBY; JOHNSON, 2002).

3.4.4 Polipropileno – PP

O polipropileno (Figura 20) é classificado como um polímero termoplástico de estrutura semicristalina (KARIAN, 2003), o mesmo é o terceiro polímero mais importante em relação ao volume de demanda (SMITH; HASHEMI, 2012). Um PP de grade comum (*standard*) apresenta baixo custo, leveza e ductilidade, entretanto, sua resistência é considerada baixa (ASHBY; JOHNSON, 2002).

Figura 20 - Representação do Polipropileno.



Fonte: Adaptado de Tripathi (2002)

As principais aplicações desse material incluem utensílios domésticos, embalagens, garrafas, tubos de ar para automóveis, mobiliário para áreas externas etc. (SMITH; HASHEMI, 2012; ASHBY; JOHNSON, 2002).

3.4.5 Elastômero Termoplástico – TPE

Um elastômero termoplástico (TPE) é um polímero, ou uma blenda polimérica que apresenta propriedades similares à borracha, mas pode ser processado (e reprocessado) em temperaturas elevadas, como um termoplástico (ISO 18064). Na presente pesquisa utiliza-se uma classe específica de TPE, a de elastômeros termoplásticos vulcanizados (TPV), obtidos a partir da mistura de polímero termoplástico com elastômero vulcanizado (Gheller Junior, 2011).

Dentre os TPVs, os mais representativos atualmente são os constituídos de EPDM e PP (NICOLINI et al., 2008). As aplicações típicas desse material incluem uso na indústria automotiva, na construção civil e produtos para o consumidor final, como

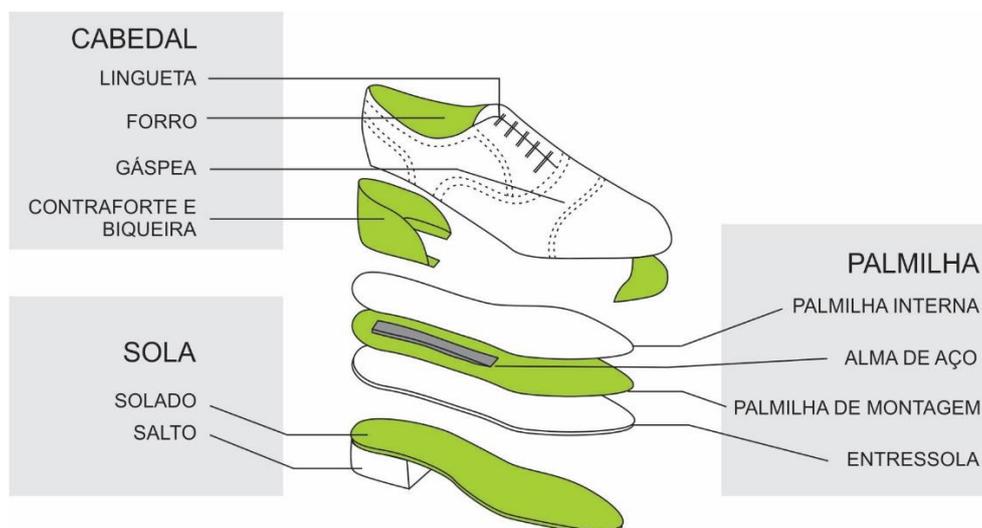
pegas de ferramentas *soft touch* e cabos emborrachados de escovas de dente (VAN DUIN, 2006).

3.5 DESIGN DE CALÇADOS

Um dos resultados apontados nas etapas práticas desse estudo é o potencial de aplicação do multi-material reciclado estudado na área de calçados e acessórios. Nesse sentido, o presente capítulo apresenta uma revisão a respeito da estrutura de calçados, assim como os principais materiais tradicionalmente utilizados nesse setor.

De acordo com Fried (2006), o calçado de uso básico deve obedecer a quatro funções: proporcionar uma superfície ao caminhar; proteger o pé do ambiente; proporcionar conforto e ser esteticamente agradável. Na visão de Reinschmidt e Nigg (2000), há uma subdivisão dos aspectos que influenciam o design de calçados, entre aspectos funcionais (prevenção de lesões, desempenho e conforto) e não-funcionais (preço, durabilidade e estética). Nesse sentido, o desenvolvimento de calçados baseia-se em pesquisas biomecânicas e ergonômicas e em pesquisas de materiais e fabricação. Nesse estudo, a temática de design de calçados é abordada com foco na seleção de materiais e processos de fabricação. A estrutura do calçado pode ser dividida em quatro partes básicas: cabedal, palmilha, entressola e solado/salto (SENAI-SP, 2015), conforme demonstra a Figura 21.

Figura 21 - Estrutura básica do calçado



Fonte: Adaptado de SENAI-SP, 2015; CHOKLAT, 20122

O cabedal é a parte estrutural superior do calçado, ou seja, toda estrutura que se encontra sobre a sola (CHOKLAT, 2012). Sua função é proteger e proporcionar conforto à parte de cima do pé. O cabedal é composto por vários componentes, tais como: gáspea, biqueira, contraforte, forro, língua, entre outros que variam conforme o estilo de cada calçado. Os principais materiais utilizados no cabedal são o couro, laminados sintéticos (normalmente produzidos a partir cloreto de vinila ou policloreto de vinil – PVC e poliuretano – PU) e materiais têxteis de diversos tipos (SENAI-SP, 2015). A palmilha confere estrutura e forma à base do calçado. É a parte de apoio do pé, responsável pela postura e sustentação do pé dentro do calçado (CHOKLAT, 2012). É dividida em palmilha de montagem, entressola e palmilha interna. A entressola é fixada entre a palmilha de montagem e o solado. É a peça responsável pela absorção de impacto, por isso é mais utilizada em calçados esportivos (SENAI-SP, 2015).

A palmilha de montagem tem a função de fixação do cabedal na sola ou entressola. Pode ser plana, conformada ou com reforço, conforme a necessidade de cada calçado. Quando o calçado apresenta salto (tanto médio quanto alto), é utilizado um reforço chamado de alma de aço, que constitui um filete de aço fixado na palmilha de montagem da planta do pé até a altura do calcanhar. A alma de aço confere sustentação e equilíbrio ao arco do pé. Posteriormente o salto é fixado na alma de aço com parafusos. A palmilha interna (sobre palmilha) é responsável pelo conforto do pé dentro do calçado. Muitas vezes a palmilha interna é utilizada para corrigir e/ou compensar alterações biométricas (SENAI-SP, 2015). De acordo com Owings e Botek (2012), os materiais tradicionalmente utilizados para a fabricação de palmilhas variam entre termoplásticos, compósitos, espumas e materiais naturais e são divididos entre materiais estruturais (*shell materials*) e materiais de cobertura (*top cover materials*), cuja função é proporcionar conforto e acomodar o pé no calçado. Dentre esses materiais, destacam-se os seguintes: a) *shell materials*: termoplásticos (os mais utilizados são o polipropileno e o polietileno) e compósito de fibra de carbono; b) *top cover materials*: espumas (dentre as mais utilizadas estão a espuma de EVA, de PU e PE), couro e cortiça.

O solado é a parte que fica em contato direto com o solo, é responsável pela tração e estabilidade durante o caminhar (SENAI-SP, 2015). O material aplicado na sola pode variar de acordo com o preço e função do calçado. O couro é utilizado na sola de calçados mais finos, para calçados mais básicos, costuma-se utilizar materiais como borracha, resina emborrachada, poliuretano e borracha vulcanizada (Choklat, 2012).

O salto é uma parte da sola fixado na altura do calcanhar. Tem como função determinar a altura do calçado conforme seu estilo e função (SENAI-SP, 2015). O material do salto deve ser rígido, geralmente utiliza-se polímero revestido de couro, mas em calçados mais finos é possível aplicar madeira ou couro aglomerado, por exemplo (Choklat, 2012).

A busca por novas tecnologias e novas soluções na área calçadista transformou o que originalmente era confeccionado em um único material (o couro) em uma diversidade de mais de 1.600 opções dentre materiais e componentes (Guia de Design do Calçado Brasileiro, 2003). Como decorrência de tal diversidade, grande parte dos calçados desenvolvidos hoje apresentam diferentes materiais em cada parte do produto, de acordo com sua função prática, que pode ser relacionada à conforto, desempenho, saúde, estética etc. (CHOKLAT, 2012).

4 ESTUDO PRÁTICO A (PARTE II)

A Parte II consiste no Estudo Prático A, a partir do qual se buscou atingir os objetivos específicos 2 ao 7 propostos nessa pesquisa. A seguir são apresentados os materiais utilizados nessa etapa, além da descrição e detalhamento dos procedimentos e métodos aplicados no estudo.

4.1 MATERIAIS E MÉTODOS – ESTUDO PRÁTICO A

4.1.1 Materiais

- Escovas de dente multi-materiais moldadas por co-injeção de diversas marcas oriundas do pré-consumo.
- Polietileno de baixa densidade linear (PEBDL) adquirido no mercado, com índice de fluidez de 10,5g/10min (folha de dados do material no anexo A).

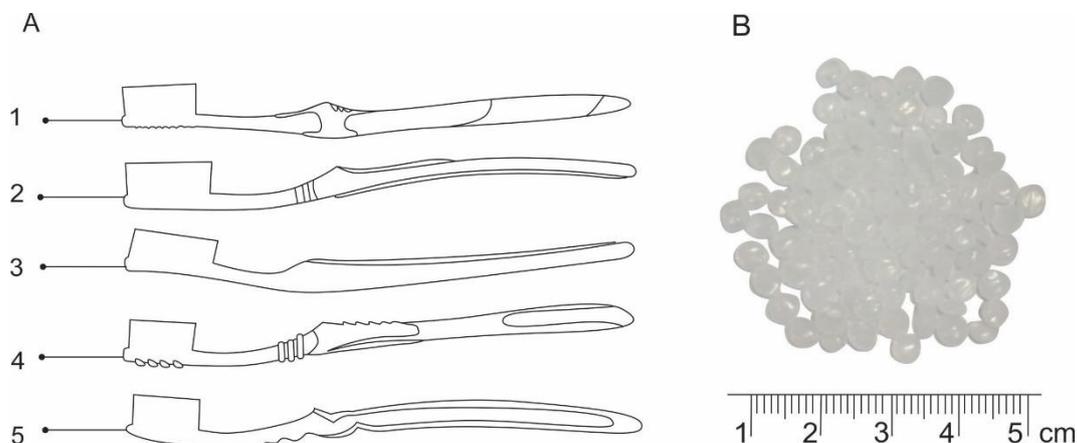
As escovas de dente foram escolhidas como material nesse estudo por serem um típico exemplo de produto multi-material co-injetado, composto por pelo menos dois materiais poliméricos no cabo (um termoplástico e um elastômero), além das cerdas, comumente fabricadas em poliamida (GROVER et al., 2012; ROSEMA et al., 2015). Ademais, escovas de dente constituem um considerável volume de material polimérico descartado. Apenas considerando o caso do Brasil, cuja população é de aproximadamente 190 milhões de habitantes, se cada habitante possuir uma escova de dente (cujo peso médio é de 15g) já teremos um volume aproximado de 12 toneladas proveniente do descarte desses produtos. Sabe-se que a recomendação dos profissionais da área de odontologia é de que as mesmas sejam substituídas a cada dois ou três meses a fim de se evitar diversos tipos de infecções (BEZIRTZOGLOU et al., 2008), o que aumenta a estimativa de material descartado. De acordo com o relatório desenvolvido na Inglaterra pelo *Chelsea Center for Recycling and Economic Development* (2000), escovas descartadas somam aproximadamente 50 milhões de libras por ano de resíduos plásticos nos Estados Unidos, gerando complicações ambientais. O PEBDL foi utilizado por questão de acessibilidade ao material, apresentar facilidade de processamento e baixo custo.

4.1.1.1 Condição do material

As escovas foram adquiridas em estado pré-consumo, embaladas em suas embalagens originais. Cinco modelos de diferentes marcas foram utilizadas nessa fase

inicial, conforme demonstrado pela Figura 22. O PEDBL foi obtido no mercado em forma de pellets.

Figura 22 – Modelos das cinco escovas utilizadas no estudo (A) e pellets de PEDBL (B)



Fonte: Figura 22 B adaptada de Ashton et al. 2016.

4.1.2 Métodos

Para uma visualização mais clara dos métodos utilizados, a Figura 23 a seguir apresenta as etapas realizadas nesse estudo prático, assim como a relação de cada etapa com os objetivos específicos (apresentados no capítulo 2) propostos nessa pesquisa. A seguir, cada etapa é detalhada e explicada.

Figura 23 - Parte II: Esquema dos métodos utilizados e relação dos mesmos com os objetivos específicos

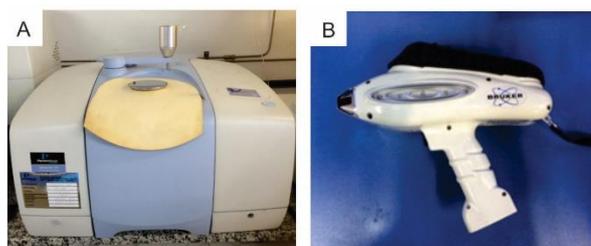


4.1.2.1 Identificação dos materiais contidos no produto

A identificação dos materiais poliméricos contidos nas escovas foi realizada através de FTIR, o equipamento utilizado foi da marca Perkin Elmer, modelo Spectrum

100 com resolução de 4cm-1 realizando 16 varreduras por amostra. O referido equipamento pertence ao Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Para a identificação do material metálico presente no produto foi utilizado um espectrômetro de fluorescência por Raio-X da marca Bruker, modelo S1 Turbo sd. Os equipamentos utilizados podem ser visualizados na Figura 24.

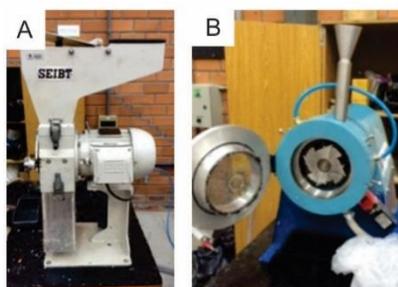
Figura 24 - Equipamento de FTIR (A) e espectrômetro de fluorescência por Raio-X (B) utilizados nesse estudo



4.1.2.2 Trituração e micronização

Antes da micronização foi necessário triturar as escovas. A trituração das mesmas foi realizada em um equipamento da marca SEIBT, modelo MGHS 15/85 com rotação de 1125 rpm e peneira de 8mm. A micronização foi realizada em um moinho da marca AX Plásticos com rotação de 1.600 rpm. Ambos os equipamentos utilizados pertencem à Universidade Feevale. O material foi submetido a dois ciclos de moagem, com peneiras de 3mm e 0,5mm, respectivamente. A Figura 25 apresenta os referidos equipamentos.

Figura 25 - Triturador (A) e moinho (B) utilizados no estudo



4.1.2.3 Verificação da morfologia e tamanho de algumas partículas geradas

A verificação das partículas geradas na trituração e nos dois ciclos de micronização foi realizada através de medições feitas no microscópio eletrônico de varredura (MEV). O equipamento utilizado é da marca Hitachi, modelo TM 3000 com

aumento de até 30.000 vezes (Figura 26). O MEV utilizado pertence ao LdSM/UFRGS. A aproximação utilizada nas amostras da trituração e do primeiro ciclo de micronização foi 50x. Na amostra do segundo ciclo de micronização as aproximações foram 50x e 100x, devido ao menor tamanho da amostra. Diferentes partículas foram medidas nas amostras, devido à irregularidade das mesmas, cada partícula foi medida em sua maior dimensão (largura ou altura).

Essa medição possibilitou a visualização da morfologia e do dimensionamento aproximado de uma pequena amostra do material após cada ciclo de moagem. A verificação da granulometria média das partículas não foi realizada nesse estudo devido a limitações do equipamento de distribuição granulométrica (principalmente devido à irregularidade no tamanho das partículas e à presença de pedaços metálicos maiores do que o limite de medição do equipamento). A verificação do tamanho médio de partículas através de distribuição granulométrica e separação em peneiras vibratórias foi realizada no estudo prático complementar.

Figura 26 - MEV utilizado no estudo



4.1.2.4 Preparação da mistura e extrusão

As escovas micronizadas foram processadas com PEBDL virgem. A proporção utilizada na mistura do material reciclado com polímero virgem foi de 30% reciclado para 70% virgem. Essa relação foi escolhida com base em outros estudos similares que indicaram que 30% de carga reciclada costuma conferir propriedades mecânicas satisfatórias sem gerar dificuldades ao longo do processamento (PEDROSO; ROSA, 2005; JACOB et al., 2001). Antes da extrusão o PEBDL virgem e o material micronizado foram secos em estufa a 60°C por 24h. A extrusão foi realizada em uma extrusora de rosca simples da marca SEIBT, modelo MR6D59 (Figura 27A). O referido equipamento pertence à Oficina de Modelos e Protótipos da Faculdade de Arquitetura, Urbanismo e Design/UFRGS. O padrão de temperatura utilizado foi baseado na folha de dados do material (anexo A) e no estudo de Hong et al. (2015), que utilizou materiais

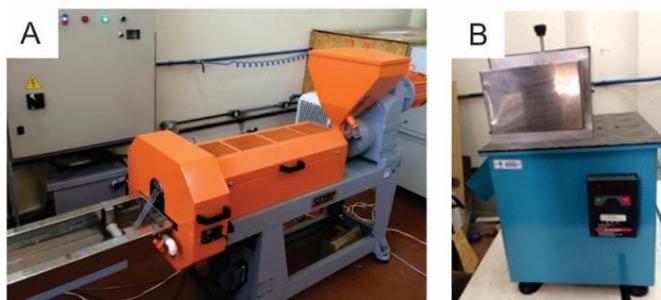
semelhantes aos dessa pesquisa. As temperaturas empregadas estão detalhadas na Tabela 2, sendo a Zona 1 a entrada e a Zona 5 a saída. A velocidade da rosca foi de 35rpm.

Tabela 2 - Padrão de temperatura utilizado na extrusão

Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
160°C	180°C	180°	190°C	200°C

Ao final da extrusão o material foi pelletizado em um picotador da marca Ax plásticos modelo AX GRAN (Figura 27B). O picotador utilizado pertence à Oficina de Modelos e Protótipos da Faculdade de Arquitetura, Urbanismo e Design/UFRGS.

Figura 27 - Extrusora (A) e picotador (B) utilizados no estudo



4.1.2.5 Injeção

A injeção dos corpos de prova foi realizada para possibilitar a comparação de propriedades mecânicas do material obtido na extrusão com o PEBDL virgem. Foram injetados, para cada amostra, dez corpos de prova (CP) para ensaio de tração e dois CP para o DMA. Para ambas as amostras foram utilizados os mesmos parâmetros, a temperatura de processamento foi determinada com base na folha de dados do material (anexo A).

Antes da injeção foi necessário remover a umidade dos materiais, por isso, as amostras permaneceram por três horas em uma estufa a 80°C. A injeção foi realizada em uma mini injetora da marca Haake, modelo Minijet II (Figura 28). O equipamento pertence ao Laboratório de polímeros Avançados (LPA) da UFRGS. Os parâmetros utilizados estão descritos na Tabela 3.

Figura 28 - Injetora utilizada no estudo



Tabela 3 -Parâmetros de injeção

Temperatura cilindro	200°C
Temperatura molde	30°C
Pressão de injeção	300 bar
Tempo de injeção	8 segundos

4.1.2.6 Caracterização

- Teste de resistência à tração

O teste de resistência à tração foi realizado em um equipamento de ensaio universal da marca Shimadzu, modelo EZ-LX (Figura 29A), que utiliza o software Trapezium X. O equipamento pertence à Oficina de Modelos e Protótipos da Faculdade de Arquitetura, Urbanismo e Design/UFRGS.

O ensaio foi realizado de acordo com a norma ASTM D638-14, sendo o corpo de prova o modelo V especificado pela referida norma e a velocidade do ensaio 100 mm/min. Foram tracionados dez corpos de prova da amostra com material micronizado e dez corpos de prova do PEBDL virgem, para posterior comparação dos resultados.

- Análise térmica dinâmico-mecânica (DMA)

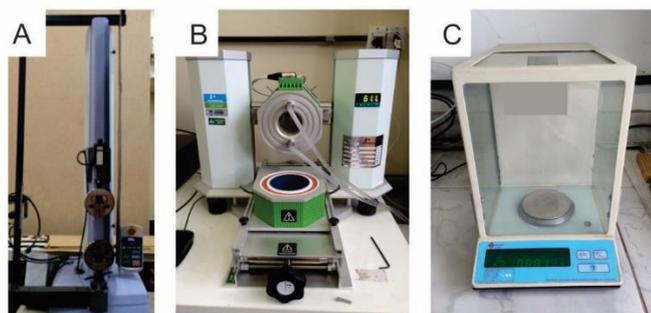
O DMA utilizado é da marca PerkinElmer, modelo Q8000 (Figura 29B). O referido equipamento pertence à Oficina de Modelos e Protótipos da Faculdade de Arquitetura, Urbanismo e Design/UFRGS. O modo de ensaio foi o single cantilever. A temperatura de operação foi de 22°C até 100°C em 2°C por minuto, com uma frequência de 1Hz.

Os parâmetros de temperatura foram definidos com base no estudo de Hong et al. (2015), devido à similaridade dos materiais analisados. Entretanto, não se atingiu temperaturas negativas nesse ensaio devido às limitações do equipamento.

- Determinação da densidade

A determinação da densidade da amostra foi feita através do método estabelecido pela norma ASTM D792, Método B. O teste foi realizado em álcool etílico e foi utilizada uma balança analítica (Figura 29C).

Figura 29 - Equipamento de ensaio universal (A), equipamento de DMA (B) e balança analítica (C) utilizados nesse estudo



4.1.2.7 Seleção de potenciais áreas de aplicação para o material resultante

Para a seleção de potenciais aplicações para o novo material reciclado (NMR), foi utilizado o Software *Cambridge Engineering Selector* (CES Edupack, 2013). Os dados obtidos na fase de caracterização do NMR foram inseridos no CES Edupack, o que permitiu a comparação do NMR com um universo de 3.906 materiais cadastrados. Dessa forma, foram construídos cinco Mapas de Propriedades de Materiais (MPM) (conforme descrito na Tabela 4) nos quais a linha de seleção exclui os materiais cujas propriedades são superiores às do NMR, considerando a combinação de propriedades determinadas em cada mapa. A escolha das propriedades utilizadas em cada gráfico foi baseada em Ashby (2009).

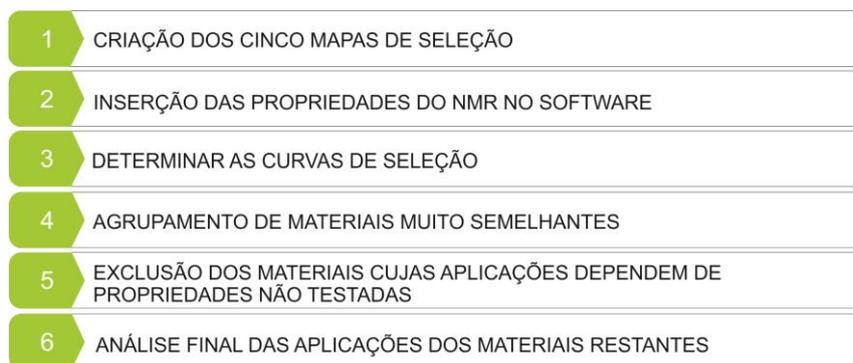
Tabela 4 - Mapas de propriedades de materiais

Mapa	Eixo Y	Eixo X
1	Tensão de Escoamento	Densidade
2	Módulo de Young	Densidade
3	Módulo de Young	Tensão de Escoamento
4	Tensão de Escoamento	Deformação
5	Tan Delta	Módulo de Young

Dessa forma, gerou-se uma listagem de materiais com performance similar ao NMR, o que significa que, em princípio, suas aplicações podem ser viáveis também para o NMR. Após a triagem inicial feita pelo software, foi realizado um agrupamento dos materiais muito semelhantes (três blendas de polietileno, por exemplo) que foram

considerados como sendo um único material, essa operação reduz o número de materiais nos mapas, o que facilita visualização dos resultados. Em seguida foi feita uma nova triagem, na qual são desconsiderados os materiais cujas principais aplicações dependem de propriedades não testadas nesse estudo. Por fim, foi feita a análise das principais aplicações dos materiais remanescentes e a verificação se o NMR tem potencial para ser utilizado nessas aplicações. A Figura 30 ilustra os procedimentos dessa metodologia de seleção.

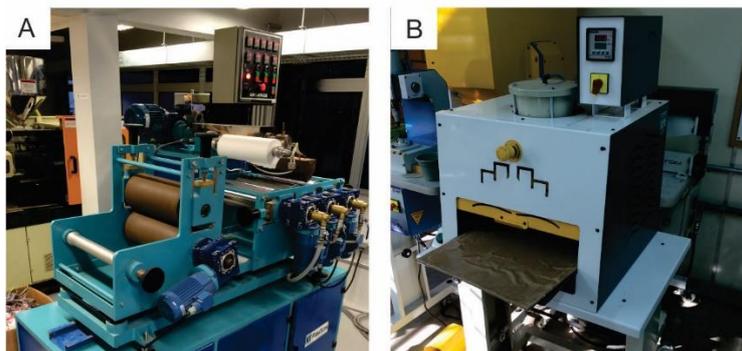
Figura 30 - Etapas da seleção de aplicação baseada no método de similaridade



4.1.2.8 Teste de viabilidade de utilização do novo material reciclado na fabricação de laminado sintético para aplicação na indústria calçadista

Para o teste de viabilidade de aplicação do novo material reciclado foram produzidos laminados sintéticos a partir do NMR utilizando como base dois tipos de material têxtil tradicionalmente utilizados para esse fim (não tecido agulhado de poliéster e uma sarja de algodão). A laminação do NMR foi realizada em uma laminadora AX Plásticos, modelo 2030 (Figura 31A), operando em temperatura de 230°C. Após a laminação, o NMR foi sobreposto ao material têxtil e passou por uma prensa pneumática (Figura 31B) com temperatura de 165°C para garantir a aderência de ambos. Os referidos equipamentos pertencem à Universidade Feevale.

Figura 31 - Laminadora e prensa pneumática utilizadas nesse estudo



Posteriormente, testou-se o novo laminado quanto aos principais processos associados à produção de calçados e componentes: corte à lamina; costura; colagem e termoformagem (para fabricação do contra-forte e da couraça). Por fim, a aplicação efetiva do NMR foi testada em três peças-piloto (palmilha de montagem, cabedal de chinelo e cinto) confeccionadas manualmente.

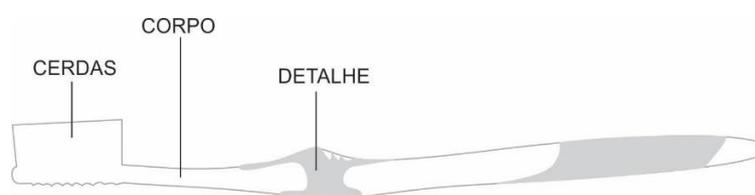
4.2 RESULTADOS DO ESTUDO PRÁTICO A

Nesse sub-capítulo os resultados obtidos no Estudo Prático A são apresentados e discutidos com embasamento na literatura. Os resultados estão organizados em subcapítulos, seguindo a ordem de execução, conforme descrito no capítulo anterior.

4.2.1 Identificação dos materiais contidos no produto

As análises de FTIR foram realizadas em três pontos das escovas analisadas, conforme demonstra a Figura 32.

Figura 32 - Pontos da escova de dente que foram analisados no FTIR



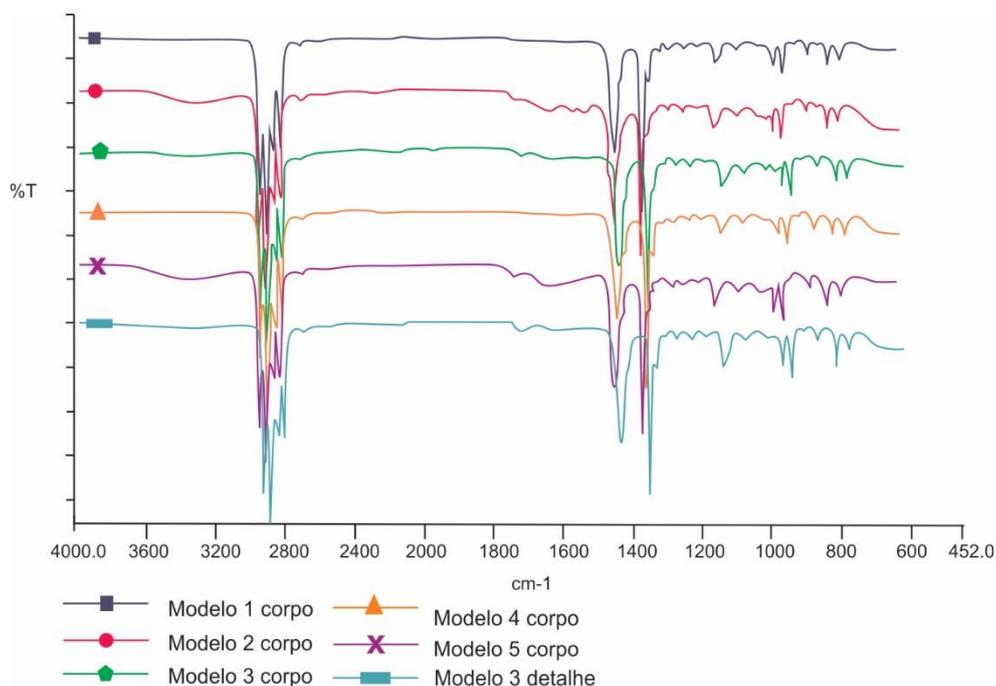
Fonte: Adaptado de Ashton et al., 2016.

Foi identificado que todos os modelos são constituídos de polipropileno (PP) no corpo do produto. Foi identificado ainda a presença do etileno-propileno-dieno (EPDM) no material que constitui o detalhe dos modelos 1, 2, 4 e 5. A única exceção, o modelo 3, é constituído de PP tanto no corpo como no detalhe. Em relação às cerdas, é reconhecido pela literatura que a Poliamida (PA), popularmente conhecida por Nylon, é o material mais utilizado (GROVER et al., 2012; ROSEMA et al., 2015).

Para confirmar tal afirmação, foi realizada a análise de FTIR nas cerdas dos modelos estudados. O resultado confirmou que o material das cerdas é a PA. As Figuras 33 a 35 representam os gráficos comparativos dos espectros de FTIR dos materiais analisados.

Na Figura 33 percebe-se, nos espectros de todos os modelos analisados, a presença de um pico por volta de 2950 cm^{-1} , que é decorrente da vibração de deformação axial assimétrica do CH_3 (SILVERSTEIN et al., 2007).

Figura 33 - Espectros de FTIR do material presente no corpo das escovas de dente e no detalhe do modelo 3



Identifica-se ainda bandas próximas a 2920 e 2870 cm^{-1} , que são associadas, por Nogueira et al. (2007) como decorrentes das vibrações de deformação do CH_2 . Destacam-se ainda a banda 1450 cm^{-1} , que está relacionada à vibração de deformação angular simétrica no plano do CH_2 (SILVERSTEIN et al., 2007) e a banda 1375 cm^{-1} , ligada às vibrações de deformação angular simétricas no plano do CH_3 (MITRA et al., 2006).

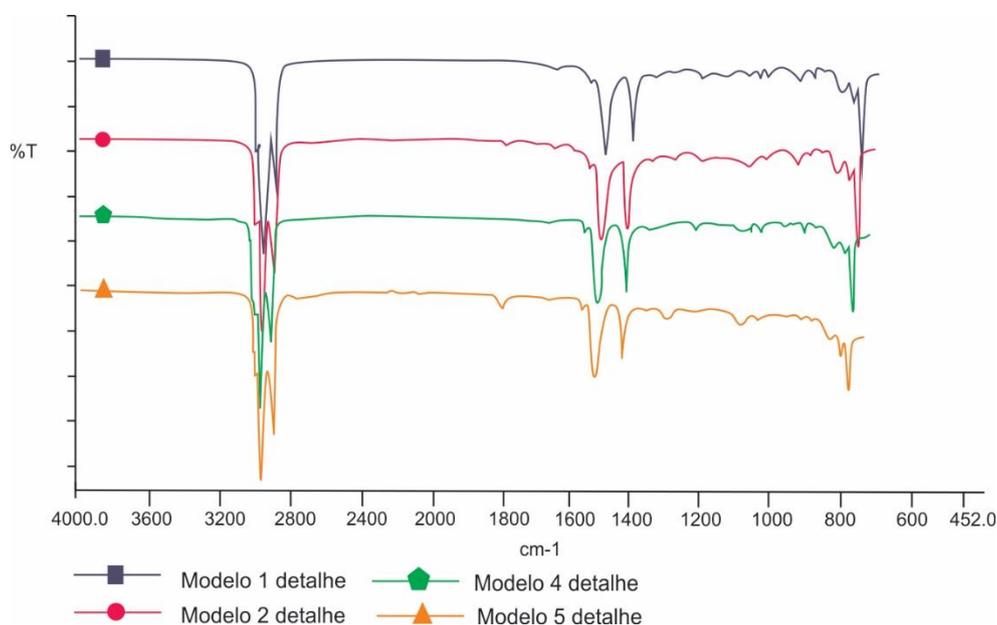
As bandas próximas a 1165 e 890 cm^{-1} são atribuídas por Carvalho et al. (2007) ao estiramento de ligações C-C e à deformação angular do CH, respectivamente. Dessa forma, com base na análise das bandas observadas na amostra e nas bandas características do polipropileno caracterizadas por pesquisas anteriores (CARVALHO et al., 2007; NOGUEIRA et al., 2007), conclui-se que o material analisado é polipropileno (PP).

Assim como nos espectros anteriores, na análise de FTIR do detalhe dos modelos 1, 2, 4 e 5 (Figura 34), identificam-se as bandas associadas ao CH_2 - por volta de 2920 e 2850 cm^{-1} , ou seja, vibração de deformação axial assimétrica e simétrica,

respectivamente, além da banda próximas de 1450 cm^{-1} associada à vibração de deformação angular simétrica no plano do CH_2 (GUNASEKARAN et al., 2007).

Percebe-se também a presença de bandas características do CH_3 por volta de 2950 cm^{-1} (vibração de deformação axial assimétrica do CH_3) e próximo de 1375 cm^{-1} (vibrações de deformação angular simétricas no plano do CH_3) (MITRA et al., 2006; SILVERSTEIN et al., 2007). Por fim, a banda próxima de 720 cm^{-1} , percebida nos espectros apresentados, está associada à deformação angular assimétrica no plano do CH_2 (SILVERSTEIN et al., 2007; MITRA et al., 2006). Dessa forma, as bandas identificadas nas amostras indicam a presença de EPDM nos materiais analisados.

Figura 34 - Espectros de FTIR do material do detalhe das escovas de dente 1, 2 ,4 e 5

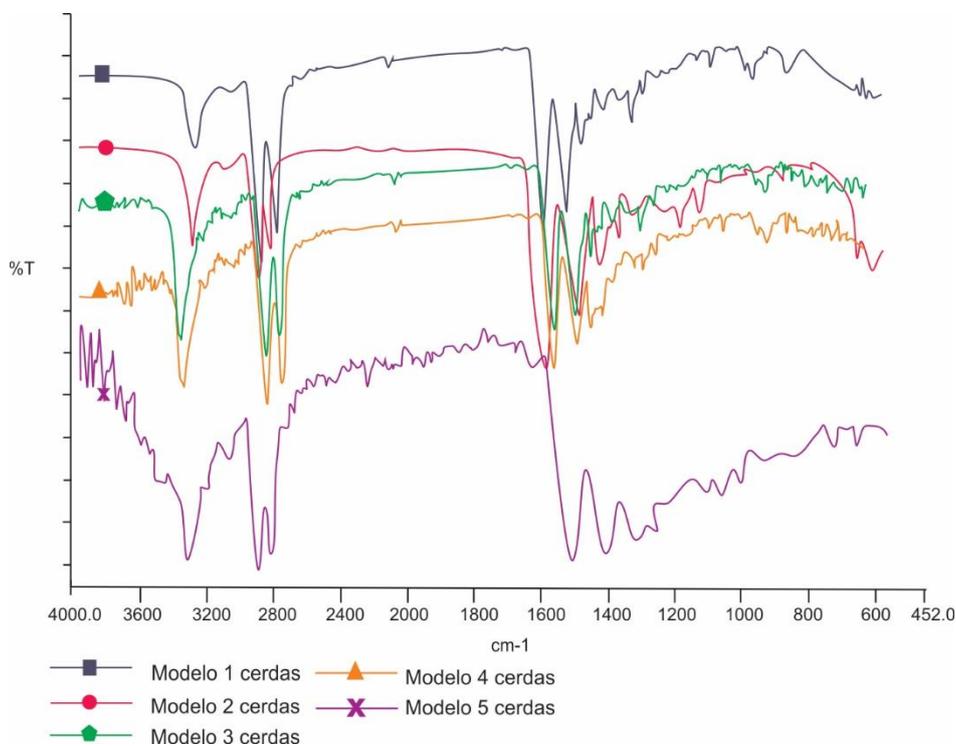


No espectro das cerdas (Figura 35), percebe-se a presença das bandas 2920 e 2850 cm^{-1} , já identificadas como vibrações de deformação axial assimétricas e simétricas do CH_2 (SILVERSTEIN et al., 2007). De acordo com Evora et al. (2002) uma das bandas que caracteriza a poliamida se encontra ao redor de 3300 cm^{-1} e tem relação com as vibrações de deformação axial do N-H. Essa banda foi observada em todos os espectros.

Além disso, para caracterizar a poliamida, deve-se ainda identificar as bandas da amida I (vibração de deformação axial de $\text{C}=\text{O}$) e amida II (vibração de deformação angular de N-H) (Evora et al., 2002), observadas aqui em 1640 e 1550 cm^{-1} ,

respectivamente. Dessa forma, é possível afirmar que as cerdas de todos os modelos analisados são de PA.

Figura 35 - Espectro de FTIR do material das cerdas das escovas



Durante a extração das cerdas para análise no equipamento, foi constatada a presença de material metálico em todos os modelo analisados. Os modelos contém pedaços metálicos de dimensões menores que 5 mm, cuja função é a fixação das cerdas na escova. O referido material metálico foi identificado como uma liga de cobre (65%) e zinco (35%). A Tabela 5 apresenta resumidamente os materiais presentes nos cinco modelos de escovas estudadas.

Tabela 5 - Materiais identificados nas escovas de dente estudadas

Modelo	Cerdas	Corpo	Detalhe	Metal
1	PA	PP	EPDM	Cu (65%) Zn(35%) - Latão
2	PA	PP	EPDM	Cu (65%) Zn(35%) - Latão
3	PA	PP	PP	Cu (65%) Zn(35%) - Latão
4	PA	PP	EPDM	Cu (65%) Zn(35%) - Latão
5	PA	PP	EPDM	Cu (65%) Zn(35%) - Latão

4.2.2 Trituração e Micronização

O material se apresentou estável na trituração e na micronização. Tanto na trituração como no primeiro ciclo de micronização, as cerdas de PA e os metais

responsáveis por fixá-las não foram moídos, passaram pela peneira mantendo o formato original.

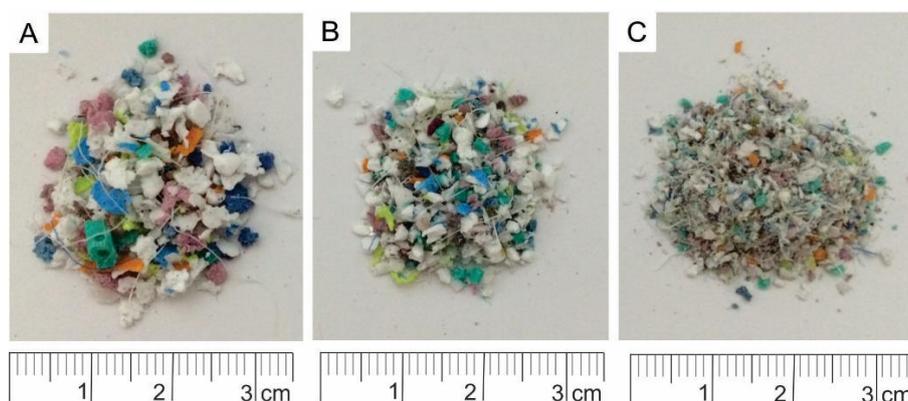
A concentração de cerdas longas não atrapalhou o processo, bastou pressionar o material em direção à lâmina que o mesmo passou sem entupir o equipamento.

No segundo ciclo de micronização, uma pequena parte das cerdas foi moída, ganhando a consistência de um pó, alguns fios mais longos de poliamida foram visíveis ao manusear o material micronizado. Quanto aos pedaços metálicos, ficou difícil de identificá-los visualmente entre as escovas micronizadas, entretanto, alguns foram identificados, o que significa que os mesmos passaram pela peneira.

4.2.3 Verificação da morfologia e tamanho das partículas geradas

Visualmente foi possível perceber grande diferença do tamanho das partículas geradas em cada etapa, conforme demonstrado, em escala macroscópica, pela Figura 36.

Figura 36 - Análise macroscópica da variação do tamanho das partículas geradas na trituração (A), na primeira micronização (B) e na segunda micronização (C)

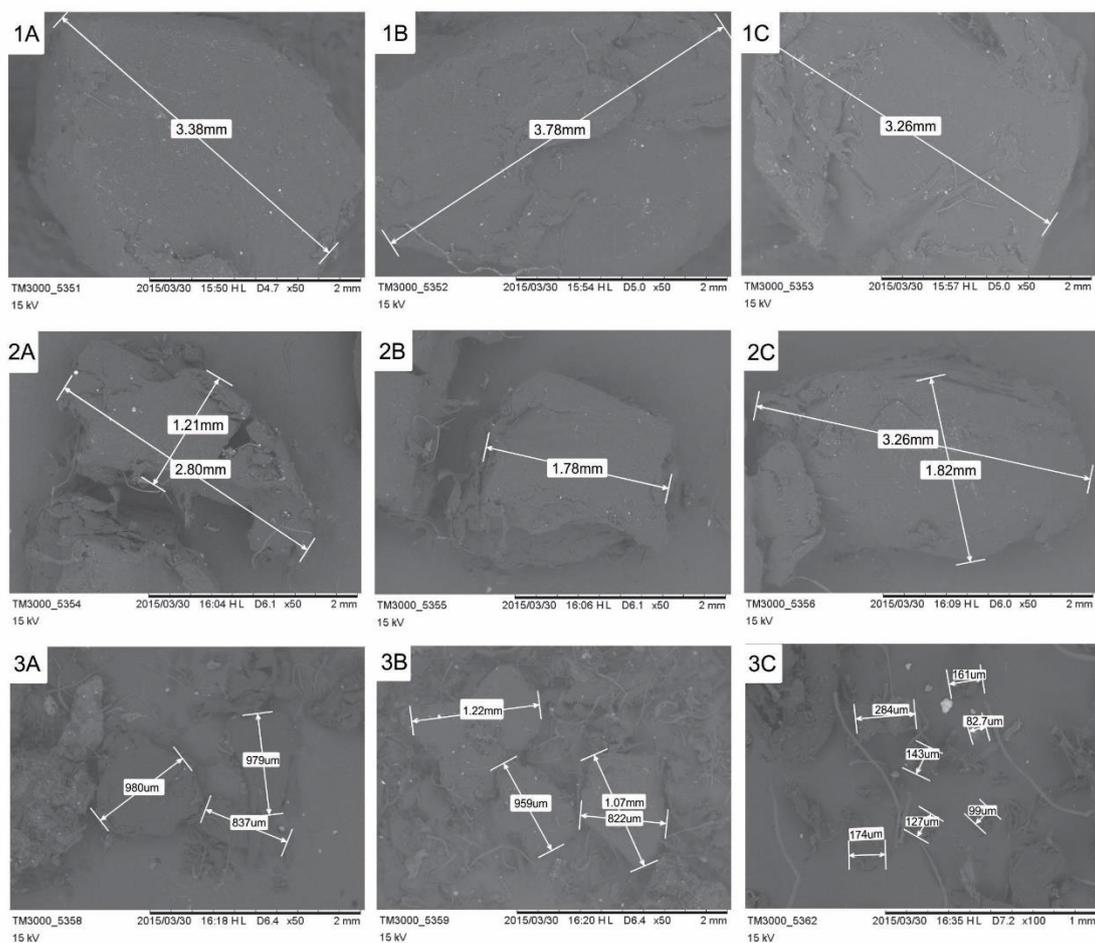


Fonte: Adaptado de Ashton et al., 2016.

As medições realizadas em imagens do MEV proporcionaram uma comparação mais exata. Assim, após a trituração, foi constatada a presença de diversas partículas entre 3,78mm a 3,26mm.

Observa-se que após o primeiro ciclo de micronização houve maior irregularidade entre o tamanho e o formato das partículas. Nesse caso, foram identificadas partículas com tamanhos que variaram entre 3,26mm e 1,78mm, conforme demonstram as imagens 2A e 2B da Figura 37.

Figura 37 - Medições da amostra obtida após a trituração (1A a 1C), após a primeira micronização (2A a 2C) e após a segunda micronização (3A a 3C)



Fonte Figuras 1A, 1B, 2B, 2C e 3C de Ashton et al., 2015

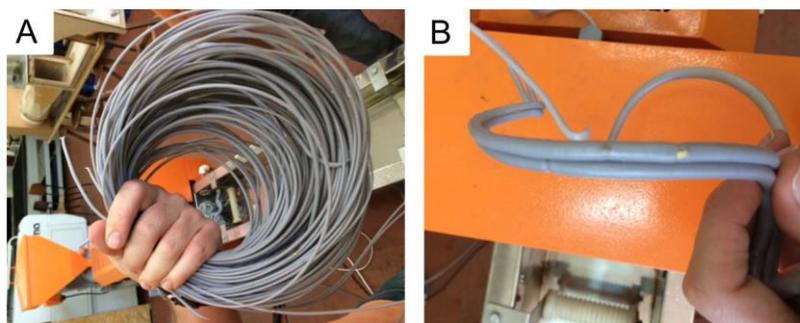
A medição da amostra gerada após o segundo ciclo de micronização (Figura 37, imagens 3A a 3C) revelou grande irregularidade entre o tamanho e o formato das partículas. Se observou uma grande quantidade de partículas muito finas (entre 0,3mm e 0,08mm) entre algumas partículas maiores (1,22mm e 0,8mm).

Observou-se, portanto, que o processo de micronização reduziu significativamente o tamanho das partículas, entretanto, o tamanho do material resultante não pode ser considerado uniforme, especialmente após o segundo processamento. Em relação à morfologia das partículas cominuídas, percebeu-se que as mesmas apresentam formato irregular, mesmo após os dois ciclos de micronização. A partir das medições realizadas, percebe-se que um único ciclo de micronização não é o suficiente para atingir a granulometria sugerida pela literatura como padrão para a micronização à temperatura ambiente (apresentado na Tabela 1, subcapítulo 3.2.3), cujo valor é determinado entre 0,42 mm e 0,21 mm. Apenas após o segundo ciclo de moagem foi possível atingir, em parte, o nível granulométrico apontado pelos autores (AYYER, 2013; LAGARINHOS; TENÓRIO, 2008) como sendo o padrão da micronização a temperatura ambiente. Dessa forma, é possível considerar que para se atingir granulometrias uniformes menores que 0,42 mm pelo método de micronização aqui adotado, mais ciclos de moagem seriam necessários. Entretanto, ao submeter o material a novos ciclos de moagem, ocorrerão novas perdas de material, o que tornaria o processo menos eficiente e, no caso aqui apresentado, tornaria a extrusão inviável por quantidade insuficiente de material. Por esse motivo, se optou por utilizar o material gerado após o segundo ciclo de moagem, mesmo com irregularidade no tamanho das partículas.

4.2.4 Extrusão e injeção

O material obtido na extrusão teve aparência homogênea, com exceção dos pequenos pedaços metálicos que ficaram aparentes no fio extrudado (Figura 38B). Muitos deles caíram durante o picotamento do fio. Não foi constatado qualquer dano ao equipamento em decorrência da presença de material metálico. Entretanto, cabe salientar que a utilização de polímeros com peças metálicas em extrusoras menores pode representar um risco ao equipamento.

Figura 38 - Fio extrudado (A) e detalhe dos metais aparentes no fio (B)



Da mesma forma, os corpos de prova apresentaram visual homogêneo após a injeção (Figura 39). Os poucos pedaços metálicos que permaneceram entre o material, não prejudicaram o processo de injeção, tampouco danificaram a injetora.

Figura 39 - Corpos de prova injetados para DMA e determinação de densidade (A) e tração (B)

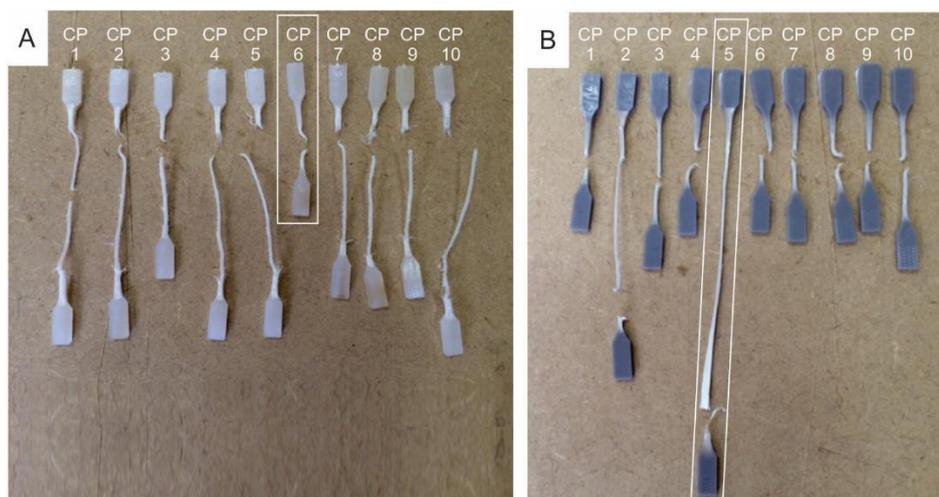


4.2.5 Caracterização

- Análise da resistência à tração e DMA

Foi avaliada a variação das propriedades mecânicas do material reciclado em relação ao PEBDL virgem (valor de referência). Para tanto, foram comparados os resultados dos ensaios de tração de ambas as amostras (chamadas aqui de amostra reciclada e amostra virgem). Foram elaborados e ensaiados dez corpos de prova (CP) de cada amostra. Entretanto, foram considerados apenas nove resultados de cada amostra. Conforme demonstrado pela Figura 40, o CP 6 da amostra virgem e o CP 5 da amostra reciclada tiveram um comportamento fora do padrão percebido nos demais CP de cada amostra, por isso, foram descartados. Em relação aos ensaios válidos, foram considerados os valores da média e o desvio padrão para a análise dos resultados.

Figura 40 - Corpos de prova tracionados da amostra virgem (A) e da amostra reciclada (B)



Fonte: Ashton et al., 2016

No geral, constatou-se que ambas as amostras apresentaram comportamento esperado de deformação. A média e o desvio padrão das amostras de referência e da reciclada são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Médias obtidas no ensaio de tração para as amostras virgem e reciclada

Amostra	Tensão de Escoamento YP (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Deformação (%)
Virgem	$17,67 \pm 0,73$	$0,809 \pm 0,13$	$294,26 \pm 27$
Reciclada	$20,92 \pm 0,51$	$0,729 \pm 0,02$	$153 \pm 36,3$

Os resultados do ensaio de tração demonstraram que houve uma significativa redução da deformação e um pequeno aumento na tensão de escoamento na amostra reciclada. Em relação ao módulo de Young houve pouca variação entre as amostras estudadas. A Figura 41 representa as curvas de *tensão x deformação* representativas das médias das amostras estudadas.

Observa-se que o novo material reciclado apresenta ductilidade e tenacidade inferior ao material virgem de referência. Isso deve estar relacionado à baixa adesão interfacial entre a matriz de PEBDL e as partículas do material micronizado. De acordo com Fu et al. (2008), em matrizes dúcteis, a adição de carga particulada aumenta a fragilidade do material devido à baixa adesão interfacial, o que causa uma ruptura antecipada quando o material está sob tensão.

Figura 41 - Gráfico tensão x deformação

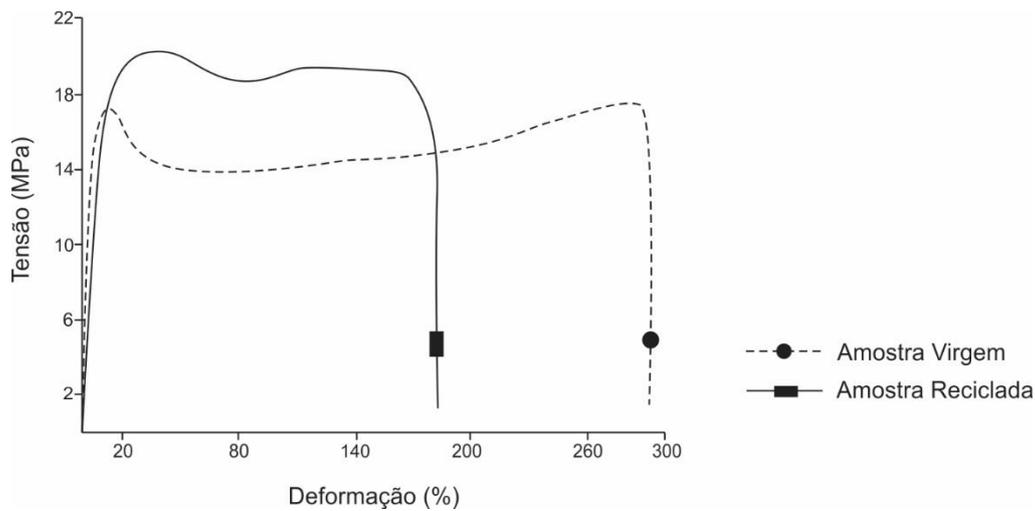
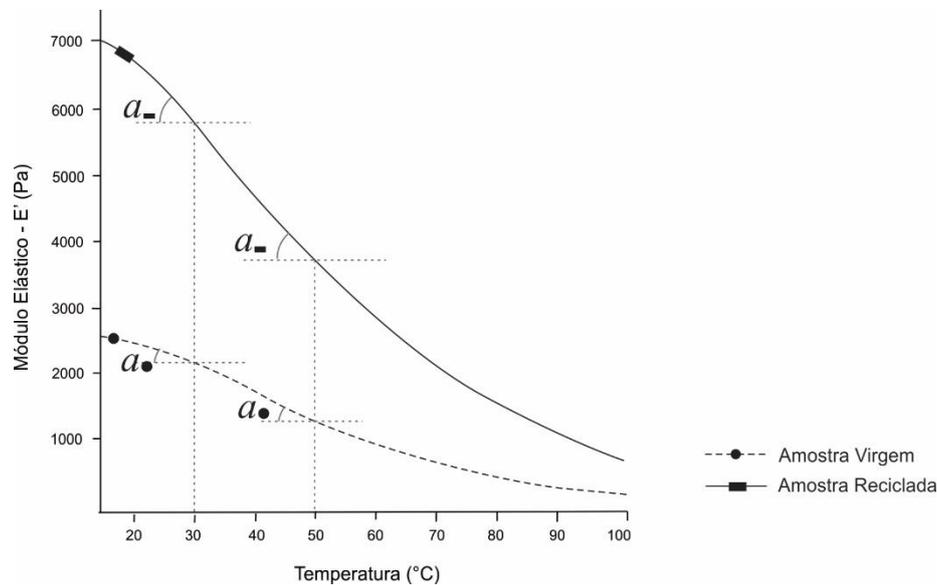


Figura 42 - Curvas do módulo elástico para as amostras virgem e reciclada



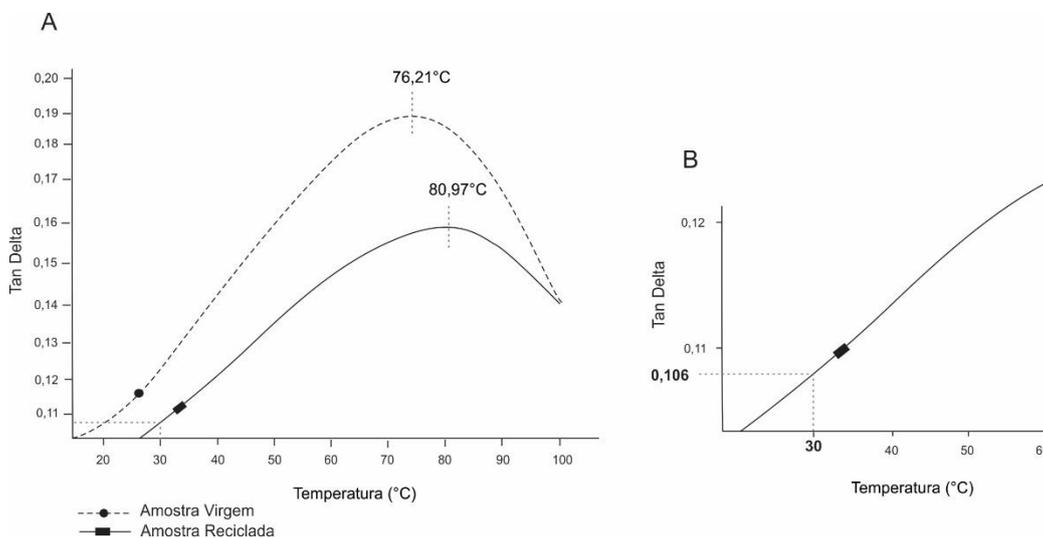
Em relação ao ensaio de DMA, a Figura 42 representa o comparativo entre as amostras virgem e reciclada em relação ao módulo elástico. Considerando que o módulo elástico tem relação com a rigidez do material, percebe-se que a curva da amostra reciclada apresenta valores mais altos do que a amostra virgem ao longo de todo ensaio (até 100°C), portanto, amostra reciclada apresentou um ganho de rigidez em comparação com a amostra de referência. Em contrapartida, as curvas geradas pelo DMA para o módulo elástico demonstram uma maior sensibilidade ao aumento da temperatura na amostra reciclada.

A Figura 42 ilustra a diferença na intensidade da queda do módulo elástico de ambas as amostras com o aumento da temperatura. Assim sendo, conclui-se que, no

caso estudado, a incorporação de carga micronizada reciclada no material virgem aumentou sua resistência, porém o material sofre uma redução mais intensa dessa resistência com o aumento da temperatura.

A Figura 43 representa um comparativo entre as curvas do Tan Delta das duas amostras estudadas, observa-se uma redução da intensidade do pico máximo da curva na amostra reciclada em relação à virgem. Tal resultado pode estar relacionado à presença de duas fases na amostra, ou seja, menor adesão interfacial do material reciclado com a matriz (SANTOS et al., 2009).

Figura 43 - Curvas de tan delta para as amostras virgem e reciclada (A) e Tan Delta da amostra reciclada a 30°C (B)



Sabe-se que um importante dado fornecido pela curva do tan delta é a temperatura de transição vítrea (T_g), representada pelo pico máximo da curva (MENARD, 2008). Entretanto, no caso analisado, o pico das curvas apresentadas na Figura 43A não podem ser considerados as T_g das amostras, uma vez que as mesmas se encontram fora dessa zona de temperatura (conforme indicado na Tabela 7). Pode-se concluir ainda que a proximidade dos picos máximos de cada curva (em relação à temperatura) demonstra que tal transição não foi alterada de forma significativa com a adição da carga micronizada. A Figura 43B demonstra o valor de tan delta em 30°C, esse valor foi importante para a construção do mapa de seleção n°5 (Tan Delta/Módulo de young) de acordo com Ashby (2009).

Tabela 7 -Temperaturas de transição vítrea dos materiais presentes na amostra

Material	Tg
PEBDL	-125 a -90°C
PP	-24 a -16°C
EPDM	-60 a -45°C
PA	8 a 20°C

Fonte: CES Selector, 2013

- Determinação da Densidade

A determinação da densidade revelou que a densidade do material estudado é 898,1 kg/m³, um pouco mais baixa que a do PEBDL (amostra virgem) que corresponde a 937 kg/m³ (de acordo com a ficha técnica do material – Anexo A). Essa redução provavelmente se deve à presença de materiais de densidade mais baixa que o PEBDL na carga micronizada, tais como o PP (899 kg/m³) e o EPDM (860 kg/m³) (CES Edupack, 2013).

4.2.6 Seleção de aplicações para o material resultante

Considerando apenas os dados obtidos na fase de caracterização, esse estudo se propõe a analisar potenciais áreas de aplicação para o novo material reciclado através da construção de Mapas de Propriedades de Materiais (MPM). Assim, a partir da caracterização do material reciclado, os dados obtidos (representados na Tabela 8) foram inseridos no software *Cambridge Engineering Selector*. Os mapas de propriedades construídos com os referidos dados são apresentados nas Figuras 44 a 48. Nessa etapa de seleção de aplicações, a amostra reciclada foi nomeada de Novo Material Reciclado (NMR).

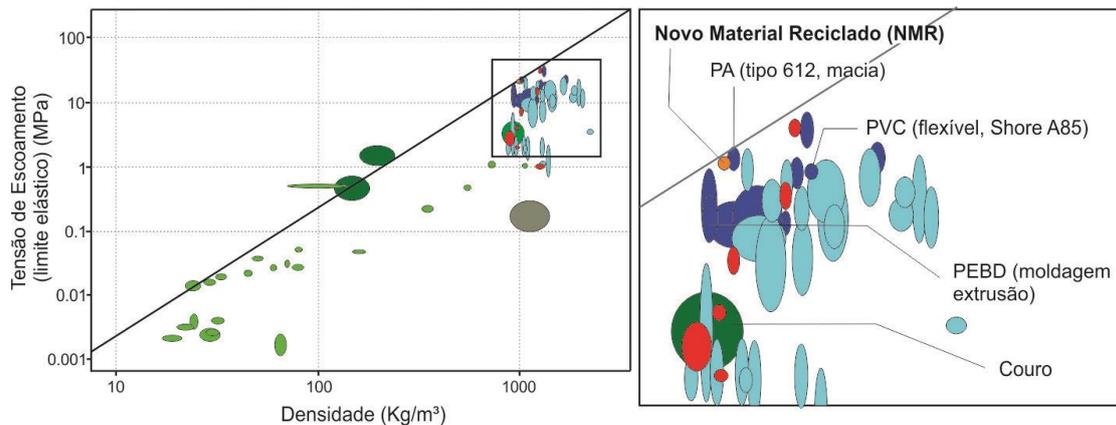
Tabela 8 -Dados obtidos na caracterização da amostra reciclada e utilizados para a construção dos mapas de seleção

Propriedade	Unidade	Média
Densidade	kg/m ³	898,1 ± 0,068
Tensão de Escoamento	MPa	20,92 ± 0,51
Deformação	%	153 ± 36,3
Módulo de Young	GPa	0,728 ± 0,027
Tan Delta (em 30°C)	-	0,106 ± 0,006

O MPM de Tensão de Escoamento contra Densidade (Figura 44) é tradicionalmente utilizado para selecionar materiais mais leves e resistentes (Ashby et al., 2014), por exemplo: encontrar algum material que suporte a mesma tensão que o

material tradicionalmente utilizado em uma dada aplicação, porém com peso reduzido; ou um material com a mesma massa, mas mais resistente.

Figura 44 - Mapa de propriedades de materiais 1 (Tensão de escoamento/Densidade)



O MPM de Módulo de Young contra Densidade (Figura 45) seleciona materiais com massa reduzida para componentes com restrições de deformação, ou seja, tem relação com a rigidez dos materiais. Já o MPM de Módulo de Young contra Tensão de Escoamento (Figura 46) permite uma comparação simultânea dessas duas propriedades. O MPM de Tensão de Escoamento contra Deformação (Figura 47) é utilizado como uma referência de tenacidade, ou seja, é aplicado para se buscar materiais que absorvem quantidades semelhantes de energia enquanto se deformam até a ruptura.

Figura 45 - Mapa de propriedades de materiais 2 (Módulo de Young/Densidade)

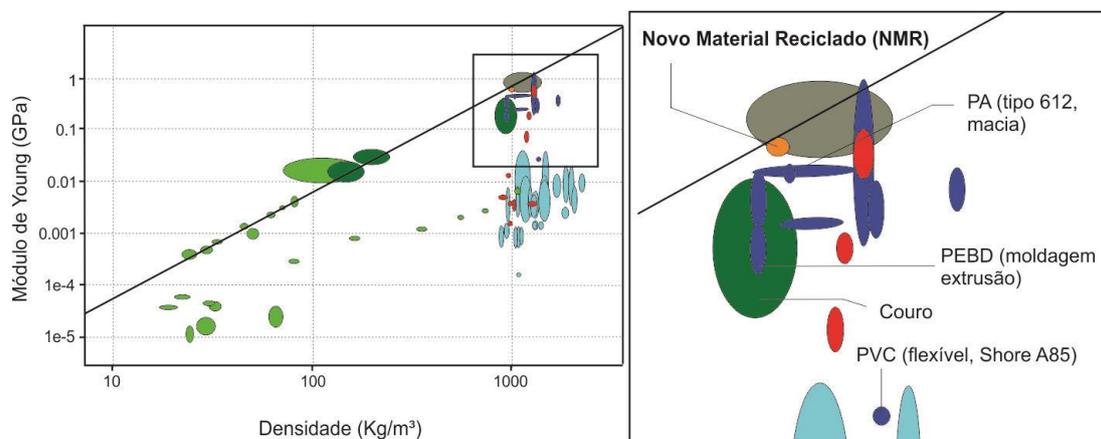


Figura 46 - Mapa de propriedades de materiais 3 (Módulo de Young/Tensão de Escoamento)

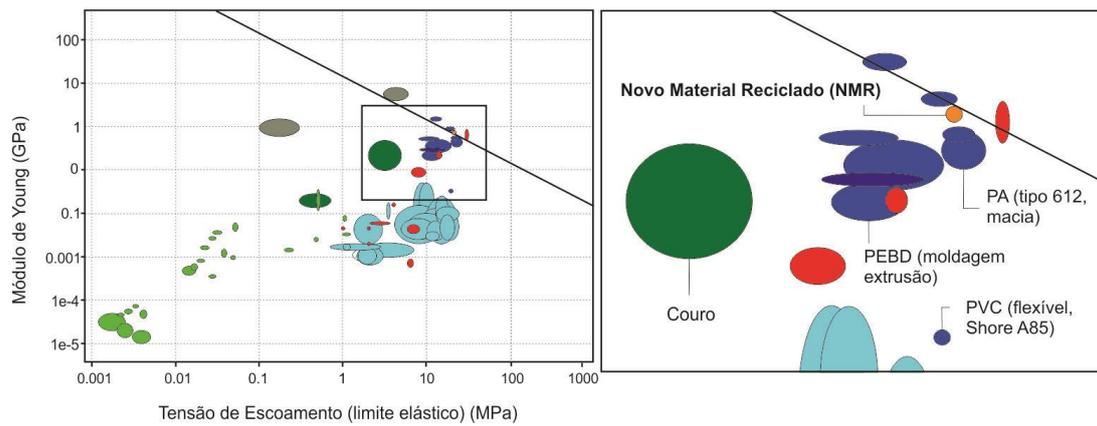


Figura 47 - Mapa de propriedades de materiais 4 (Tensão de Escoamento/Deformação)

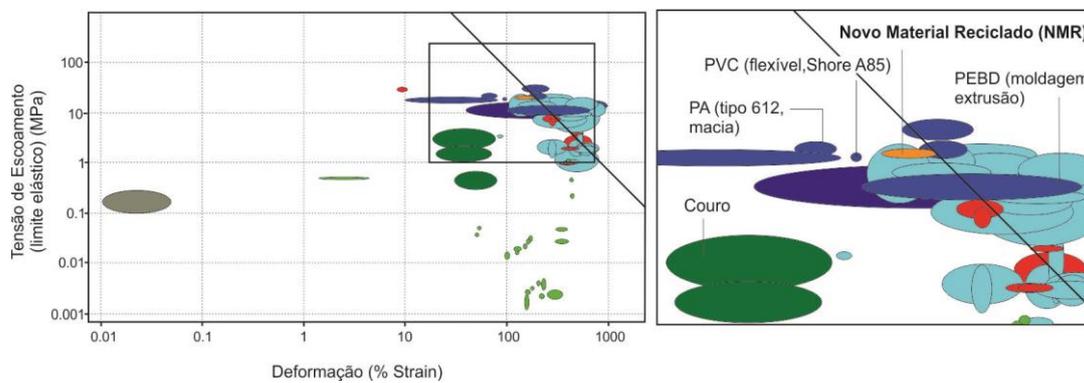
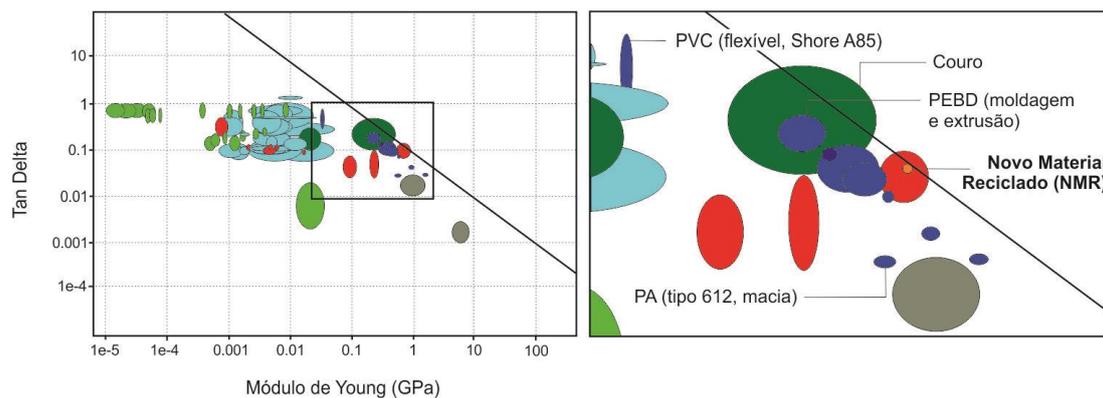


Figura 48 - Mapa de propriedades de materiais 5 (Tan Delta/Módulo de Young)



O MPM de Tan Delta contra Módulo de Young (Figura 48) mostra materiais para aplicações que envolvem amortecimento, ou seja, aqueles que absorvem ruído e vibração. A curva de seleção mostra materiais com menos capacidade de amortecimento do que o NMR.

Após a construção desses cinco Mapas de Propriedades de Materiais, o software CES Edupack listou 71 materiais (de um universo inicial de mais de 3.900 materiais registrados) que passaram em todas as etapas. Dentre esses 71 materiais percebeu-se uma quantidade significativa de polímeros termoplásticos e elastômeros (representados nos mapas como esferas azuis escuras e azuis claras, respectivamente). Também foram listadas algumas espumas (verde claro), materiais naturais (verde escuro) e cerâmicos não técnicas (cerâmica de telha e concreto, representados pela cor cinza). As elipses vermelhas representam polímeros termoplásticos. Para refinar ainda mais os resultados, materiais muito semelhantes foram agrupados, por exemplo: três blendas de polietileno foram consideradas como sendo um único material, reduzindo o número de opções para a comparação final.

Cada um dos materiais remanescentes nos mapas foi analisado e passou por uma nova triagem. Os materiais cujas principais aplicações dependem de propriedades não testadas nesse estudo foram descartados. As borrachas, por exemplo, são muito utilizadas em aplicações que dependem de resistência química (CES, 2013), propriedade não avaliada nesse estudo, portanto esses materiais foram desconsiderados na análise final. Outros materiais descartados nessa etapa foram as cerâmicas não técnicas devido à sua resistência a altas temperaturas e intempéries, que constitui um requisito para suas principais aplicações (acabamento de telhados, paredes e pisos além de revestimentos contra incêndios) (CES, 2013, Somiya, 2013). Além dessas propriedades não terem sido testadas nesse estudo, é sabido que, de maneira geral, os polímeros não suportam temperaturas extremamente altas e sofrem com as intempéries em ambientes externos, especialmente com a incidência de raios UV (CES, 2013), o que limita sua aplicação em substituição às cerâmicas. Assim, a cerâmica vermelha e o concreto também foram excluídos das opções finais. As espumas também foram descartadas.

Depois dessa filtragem, obteve-se um conjunto mais restrito de quatro materiais, que chamam a atenção por terem apresentado um desempenho muito próximo do NMR em todos os gráficos, os quais são: couro natural, policloreto de vinila (PVC) flexível, poliamida (PA) tipo 612 e polietileno de baixa densidade (PEBD). A primeira conclusão obtida a partir da construção dos MPM é que o NMR não deve apresentar uma performance satisfatória em aplicações estruturais, já que dentre os materiais restantes, a grande maioria tem aplicações tipicamente não estruturais. A seguir, é apresentada uma análise dos quatro materiais finais e de suas principais aplicações.

- Couro Natural

O couro é um material natural cujas principais aplicações incluem calçados, bolsas, cintos, vestuário, forros e revestimentos diversos. Essas opções são associadas ao couro devido à sua resiliência e resistência (ASHBY et al., 2014). A principal desvantagem do couro natural é a questão ambiental, isso se deve, principalmente ao processo de curtimento que envolve substâncias tóxicas e libera resíduos líquidos com significativas concentrações de poluentes de baixa biodegradabilidade (DAYANANDAN et al., 2003, CASSANO et al., 2001, LOFRANO et al., 2013). Além disso, o couro é um material nobre de preço alto e com restrição dimensional. Na indústria calçadista, por exemplo, um couro bovino pode produzir em média 20 pares de calçados (ANDRADE; CORRÊA, 2001).

A alternativa ao couro são os laminados sintéticos (erroneamente chamados de couro sintético ou couro artificial), que demonstram algumas vantagens sobre o couro natural em relação à variedade de cores, estilos, preço e performance, apesar de também apresentar desvantagens ambientais (XU; ZHIPINGB, 2011). Um dos materiais mais utilizados para a fabricação de laminados sintéticos é o PVC flexível (CES, 2013, CHENG et al., 2015), material que também passou em todas as etapas da seleção e apareceu próximo do NMR nos mapas.

- Policloreto de Vinila (PVC) Flexível

As principais propriedades apresentadas pelo PVC flexível que o tornam viável para fabricação de laminado sintético (especialmente na área calçadista) é a flexibilidade, preço baixo (comparado com o couro natural) e a relativa facilidade de processamento (ANDRADE; CORRÊA, 2001). Entretanto, produtos de PVC flexível apresentam alto risco ambiental além de riscos à saúde humana. Existem restrições ao seu uso em relação aos limites da emissão gases tóxicos decorrentes da produção do PVC (KONAR et al., 2013, US PROTECTION AGENCY, 2015, PACHECO-TORGAL, et al., 2012). Nesse aspecto, o NMR poderia apresentar vantagem em relação ao PVC flexível na fabricação de laminado sintético. Entretanto, em relação à flexibilidade dos materiais, o mapa 3 (Módulo de Young/Tensão de escoamento) mostra que o NMR apresenta menos flexibilidade que o PVC flexível e o couro natural. Dessa forma, é esperado que em uma eventual substituição do PVC pelo NMR na fabricação de laminado sintético o material final apresente uma rigidez superior à do PVC e do

couro. Essa situação deve orientar a aplicação do material final, por exemplo: ao invés de ser aplicado em todo cabedal, um laminado sintético mais rígido poderia ser pensado para uso em partes específicas, como a biqueira.

PVC flexível também é muito utilizado na fabricação de recobrimento para cabos (CES, 2013). Essa aplicação também é atribuída ao polietileno de baixa densidade (PEBD) (CES, 2013), outro material que se aproxima do NMR em todos os mapas, o que indicaria grande potencial de aplicação do NMR nessa função. Entretanto, recobrimento de cabos é uma aplicação que exige isolamento elétrica e testes contra chama, propriedades não testadas nesse estudo, portanto, tal aplicação foi desconsiderada nessa pesquisa.

- Polietileno de baixa densidade (PEBD)

O PEBD já era esperado entre os materiais finais, já que o mesmo constitui a matriz (70%) da blenda do NMR. O PEBD é um termoplástico vastamente utilizado (é um *commodity*), dentre suas principais aplicações destaca-se: recipientes e tigelas, embalagens de alimentos, garrafas *squeeze*, brinquedos e aplicações que exigem resistência química (CES, 2013). Essa última aplicação foi desconsiderada, já que a resistência química não foi testada nesse estudo. A utilização de PEBD em recipientes e tigelas constitui uma aplicação bastante ampla e genérica, já que pode ser relacionada a uma grande variedade de objetos (o produto final poderia ser utilizado para comida, plantas, objetos de escritório, ferramentas, objetos domésticos etc.), portanto, a aplicabilidade do NMR nesse caso pode variar, sendo desaconselhável quando estiver em contato com alimentos e sem contra-indicações no caso de ser utilizado para guardar ferramentas, por exemplo.

Em relação à utilização do NMR em embalagens para alimentos, garrafas e brinquedos, é importante destacar que os aditivos presentes nos materiais poliméricos (tais como plastificantes) podem ser transferidos para os novos produtos, dessa forma, seu uso em objetos para crianças, como brinquedos, devem ser submetidos a restrições rigorosas (LONAS et al., 2014). O mesmo deve ser observado quando da aplicação de polímeros em garrafas de água potável e artigos que terão contato com alimentos. A utilização de materiais poliméricos nesses produtos é controversa em relação à toxicologia do material (BACH et al., 2012), o que é regulado pela Comissão Reguladora da Europa - *European Commission Regulation* (EU) N° 10/2011 de 14 de

janeiro de 2011. Dessa forma, essas aplicações envolvendo utilização por crianças e contato com alimentos/bebidas não são recomendáveis em termos de saúde, portanto, foram desconsiderados nessa pesquisa.

- Poliamida (PA):

Outro material que demonstrou características similares ao NMR foi a Poliamida. Suas principais aplicações incluem recobrimentos e revestimentos que envolvem resistência à abrasão, fios e tecidos e filamento para impressora 3D (CES, 2013). Como já referido anteriormente, a resistência á abrasão não foi testada, por isso, a aplicação do NMR em recobrimentos e revestimentos foi desconsiderada.

A possibilidade de utilização do NMR na fabricação de fios e tecidos é interessante, já que seria uma forma de agregar valor ao material e ao novo produto. Diversos estudos demonstraram a viabilidade de utilização de polímero reciclado (especialmente Politereftalato de Etileno - PET) na fabricação de produtos têxteis com alto valor agregado (SHUKLA et al., 2008, SHUKLA et al., 2009 KUCZENSKI; GEYER, 2010, PARK; KIM, 2014), o que reforça o potencial do NMR nessa área, entretanto, a presença dos pedaços metálicos no NMR deve gerar complicações na fabricação do fio, sendo recomendada a retirada das peças metálicas para essa aplicação. Em relação à fabricação de filamentos para impressora 3D, sabe-se que a prototipagem rápida é uma tendência global e aplicações nessa área são de alto valor agregado (GEBLER et al., 2014). Esse setor está em expansão e já é utilizado em diversas áreas, tais como engenharia de produção (BACK, 2003), medicina (MICHALSKI; ROSS, 2014, SCHOUBERT et al., 2013), robótica (MAJIDI, 2014) entre outros. Nesse sentido, a utilização do NMR em filamentos para impressão 3D é uma potencial área de aplicação, entretanto, algumas questões devem ser observadas. Apesar de alguns estudos terem aplicado polímeros reciclados em filamentos para equipamentos de prototipagem (BAECHLER et al., 2012, KREIGER et al., 2014), os requisitos de qualidade em relação ao material do filament são altos. Nesse sentido, a presença de peças metálicas no NMR, assim como no caso da fabricação de fios e tecidos, pode limitar ou até impedir seu uso nessa aplicação.

Considerando as potenciais áreas de aplicação exploradas nesse estudo, aquela que mais parece se adequar às características do NMR no estado em que o mesmo se encontra (considerando apenas as propriedades testadas nesse estudo) é a fabricação de

laminado sintético para indústria calçadista. Essa conclusão é baseada na similaridade de várias propriedades do NMR, PVC flexível e o couro natural. Além disso, a indústria calçadista consome volumes altos de material, considerando que a produção mundial de calçados é estimada em vinte bilhões de pares de calçados por ano (LEE; RAHIMIFARD, 2012), isso é importante, pois garante uma demanda significativa do NMR em substituição ao material virgem. Destaca-se ainda que o NMR deve suprir de forma satisfatória os requisitos ambientais e de saúde que envolvem a indústria calçadista, uma vez que esse setor tradicionalmente utiliza materiais mais danosos do que o NMR, tais como couro (gerador de poluição no processo de curtimento) e o PVC (relacionado a emissão de gases tóxicos).

No design tradicional de calçados o couro (ou laminados sintéticos equivalentes) são utilizados nos elementos que compõem o cabedal (ANDRADE; CORRÊA, 2001), sendo essa a posição que o NMR ocuparia. O couro também pode ser utilizado na sola do calçado, entretanto, existem atualmente uma variada gama de materiais com tecnologia anti-derrapante e absorção de impacto, tais como espumas poliméricas elásticas e viscoelásticas, borrachas, compósitos, fluídos e molas (PALHANO et al., 2014, MANNING; JONES, 2001), que devem ser mais apropriadas, já que o NMR não foi testado para garantir a segurança do usuário.

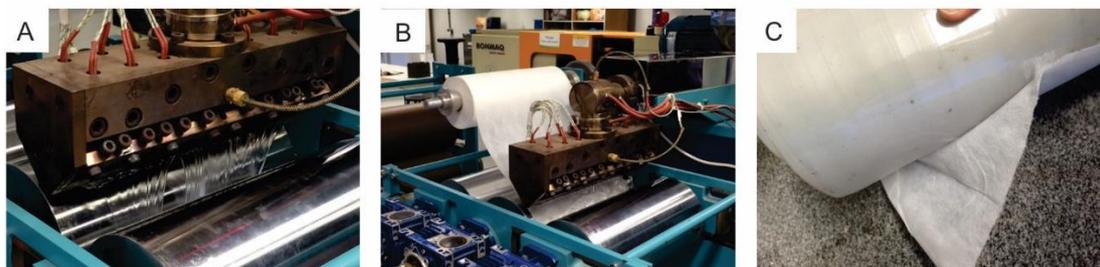
Até esse ponto, o Estudo Prático A levantou como uma potencial área de aplicação para o NMR a fabricação de laminado sintético para a indústria calçadista, entretanto, apenas o teste efetivo do novo material na aplicação proposta pode confirmar a viabilidade dessa aplicação. Sendo assim, é apresentado a seguir o teste de viabilidade de utilização do NMR na fabricação de laminado sintético e aplicação em calçados e acessórios.

4.2.7 Teste de viabilidade de utilização do novo material reciclado na fabricação de laminado sintético para aplicação na indústria calçadista.

O teste de viabilidade de aplicação do novo material reciclado consistiu na fabricação do laminado sintético a partir do NMR e do teste de aceitação aos processos de fabricação de calçados e acessórios. O processo de laminação consiste na introdução dos pellets na alimentação do equipamento. O material é aquecido em um cilindro e empurrado para a saída da zona de aquecimento, onde o mesmo é laminado com uma base têxtil entre dois cilindros aquecidos. O resultado da laminação (Figuras 49A e B)

não foi totalmente satisfatório, uma vez que o NMR não teve aderência na base têxtil (Figura 49C). Como alternativa, o processo foi repetido com sarja de algodão, mas também não houve aderência do NMR.

Figura 49 - Etapas do processo de laminação



Outra tentativa de se obter a aderência do NMR na base têxtil foi realizada em uma prensa pneumática. O NMR laminado foi submetido à compressão com aquecimento, o que resultou em uma aderência satisfatória do NMR com o tecido de algodão (Figura 50A). Após a obtenção do laminado sintético do NMR, foram confeccionadas peças-piloto, fabricadas para testar a aplicação em palmilha de montagem e no cabedal de um chinelo, respectivamente.

Para a fabricação da palmilha de montagem, o NMR foi aplicado no verso do tecido de algodão (lado liso) (Figura 50C e D) e para o cabedal, o NMR foi aplicado no lado estampado do tecido (Figura 50A, B, D e E). Ambos apresentaram boa aderência do NMR no material têxtil. Essa possibilidade de aplicação em ambos os lados do tecido permite que o tecido de algodão fique em contato com a pele, tanto no cabedal, quanto na palmilha, proporcionando maior conforto.

Na fabricação das peças-piloto, observou-se que a rigidez do laminado sintético estudado foi adequada para a fabricação do cabedal de chinelo (que consiste em tiras estruturadas). Entretanto, para a fabricação de cabedal para um calçado fechado (como uma sapatilha, por exemplo), constatou-se que a rigidez do material é muito alta, o que dificulta muito a modelagem do cabedal. Assim, o laminado sintético produzido a partir do NMR não é adequado para aplicação em cabedais de calçados fechados, devido à falta de maleabilidade. Já a aplicação no cabedal de chinelo e na palmilha de montagem o resultado foi satisfatório e a aplicação foi considerada viável. Destaca-se ainda que o material foi cortado à lamina sem dificuldade e passou pelo processo de costura em máquina conforme o esperado.

Figura 50 - Preparação do laminado em prensa pneumática e etapas da preparação de peças 1 e 2 para um chinelo



Foi produzida também outra peça-piloto, na qual o NMR foi utilizado como material de reforço, agindo como um inibidor de deformação na fabricação de cintos. Para isso, o NMR foi montado por meio de colagem e costura entre dois tecidos sintéticos, conforme demonstra a Figura 51. Posteriormente, foi aplicada a fivela de metal.

Figura 51 - Etapas da montagem de um cinto (peça-piloto 3)

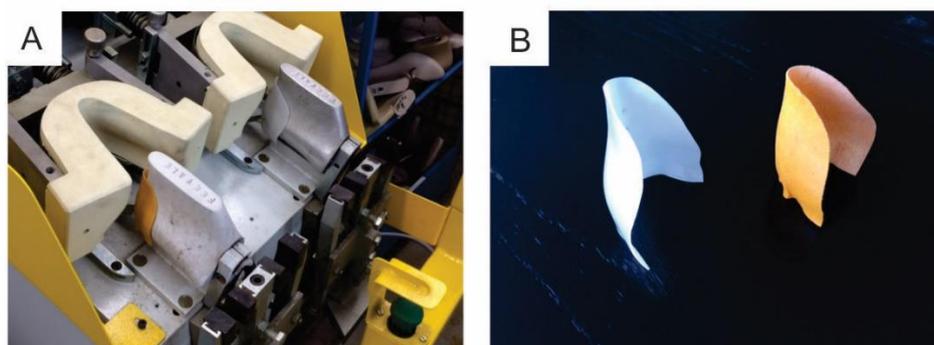


Assim como na fabricação das peças para o chinelo, o NMR apresentou boa aceitação à costura. Em relação à colagem, observou-se uma boa aderência do NMR ao tecido sintético e ao couro natural, entretanto, não há aderência suficiente entre duas lâminas do NMR. Para a fabricação da peça 3, bastou a aderência ao material têxtil, portanto, o resultado observado na peça final foi satisfatório.

Por fim, o NMR passou pelo processo de termoformagem para a fabricação de um contraforte. Constatou-se que o NMR laminado apresentou resultado muito

semelhante ao material tradicionalmente utilizado para esse fim (Figura 52). Ambos aderiram à forma do molde e a mantiveram, entretanto, percebeu-se que o contraforte fabricado com o NMR é mais rígido do que o tradicional. Nesse caso, a verificação da viabilidade de aplicação do NMR em contraforte, deve passar pela efetiva fabricação do calçado e pelo teste de conforto e resistência do material aplicado ao calçado ao longo do uso. Essa etapa não será abordada nesse estudo uma vez que se buscou exemplificar a viabilidade de aplicação.

Figura 52 - Processo de termoformagem (A) e contrafortes moldados (B)



A Tabela 9 a seguir apresenta de forma resumida o desempenho do NMR em relação aos processos aos quais foi submetido. Demonstram-se os pontos positivos e negativos do NMR em cada processo, assim como o seu desempenho em comparação com o material tradicionalmente utilizado.

Tabela 9 - Desempenho do laminado estudado nos processos analisados

Processo	Positivo	Negativo	Comparativo
Laminação	Foi facilmente laminado.	Não houve boa aderência na base têxtil. Necessidade de um segundo processo (prensa).	Apresenta limitação.
Corte à lamina	Foi facilmente cortado à lâmina e apresentou bom acabamento quando cortado com lâmina afiada.	Nenhum	Similar.
Costura à máquina	Foi facilmente costurado em máquina.	Nenhum	Similar.
Colagem	Apresentou boa aderência na colagem em laminado tradicional e com couro natural.	Não apresentou boa aderência na colagem de duas lâminas do laminado de NMR	Apresenta limitação.
Termoformagem	Aderiu à forma do molde e a manteve.	Nenhum	Apresenta maior rigidez.

4.3 DISCUSSÃO DO ESTUDO PRÁTICO A

O Estudo Prático A demonstrou a viabilidade técnica de se promover a reciclagem de escovas de dente multi-materiais através da redução do tamanho das partículas do material (micronização) e a potencialidade de aplicação do material resultante em um novo produto com valor agregado. A partir dos resultados observados, conclui-se que o processo de micronização adotado nesse estudo foi capaz de promover a redução do tamanho das partículas do material estudado, sem que o mesmo sofresse degradação ou danificasse o equipamento. Destaca-se, no entanto, que o tamanho das partículas geradas após os ciclos de moagem atingiu apenas parcialmente o tamanho sugerido pela literatura como padrão da micronização à temperatura ambiente, além disso, houve grande irregularidade no tamanho e no formato das partículas ao final da moagem. Dessa forma, entende-se que uma maior redução do tamanho das partículas (e maior uniformidade de granulometria) poderia ter sido obtida através de um terceiro ciclo de moagem e uma triagem em peneiras vibratórias. Considerando essa constatação, a utilização de três ciclos de moagem e separação de granulometria em peneiras vibratórias foi aplicada no estudo complementar (Estudo prático B).

Ainda em relação ao processo de micronização, apesar de a literatura ter indicado uma média levemente mais baixa de granulometria para materiais micronizados à temperatura ambiente, percebeu-se que o tamanho das partículas obtidas nesse estudo foi suficiente para promover a reciclagem dos produtos estudados. Partindo dessa conclusão, considera-se interessante estudar o processo de reciclagem de multi-materiais com granulometrias maiores, já que se for constatada a possibilidade de se promover o reprocessamento de multi-materiais sem a necessidade de se atingir granulometrias muito baixas, isso representaria uma menor perda de material, além de redução do tempo e custo do processo, tornando-o mais eficiente. Dessa forma, a influência do tamanho da granulometria no multi-material reciclado é o objeto do Estudo prático B.

Em relação à viabilidade técnica de aplicação dos processos de extrusão e injeção os resultados foram satisfatórios. O fato de se processar materiais de granulometrias distintas (matriz e carga) não dificultou o processo de extrusão. Além disso, o material resultante apresentou aparência homogênea e coloração sólida em tom de cinza. A aparência e textura do material extrudado e injetado pode ser considerado

um diferencial quando se trata de material reciclado. Em relação aos fatores técnicos da extrusão e injeção, não foi constatada degradação do material, mesmo tratando-se de processos subsequentes aplicados a um material reciclado. Considera-se relevante ainda o fato de o material não ter danificado os equipamentos, uma vez que a mistura micronizada continha pequenas peças metálicas. Apesar de constatada a possibilidade de se reprocessar o produto inteiro (sem separação de materiais), entende-se adequado remover as peças metálicas do produto antes dos processos de extrusão e injeção, o que deve melhorar a aderência interfacial e melhorar as propriedades mecânicas, evitando que o material se rompa em decorrência de um ponto de tensão causado pelo metal. Assim sendo, a remoção dos metais através de separação eletrostática é considerada no Estudo Prático B.

Em relação à caracterização do material, o estudo analisou a resistência à tração, o comportamento térmico dinâmico-mecânico e a densidade. Os resultados evidenciaram que a incorporação da carga reciclada conferiu maior resistência mecânica ao material, o que pode ser considerado um ganho de desempenho. Em contrapartida, o material reciclado apresentou perda de tenacidade e ductilidade em relação ao PEBDL virgem. Além disso, o mesmo apresentou uma perda de rigidez mais intensa (se comparada à amostra virgem) com o aumento da temperatura.

A caracterização foi essencial na busca de potenciais áreas de aplicação para o NMR através da construção de mapas de propriedades de materiais (MPM). Essa etapa demonstrou que o NMR possui um mix de propriedades que envolvem resistência, flexibilidade e tenacidade. A utilização do método de similaridade por proximidade na construção dos mapas possibilitou a identificação de um seleto grupo de quatro materiais muito semelhantes ao NMR, que levou à percepção da potencialidade de aplicação do mesmo em componentes para calçados, o que dificilmente seria perceptível sem a construção dos mapas e do método utilizado.

A potencialidade de aplicação do NMR na área calçadista, apontada pelos MPMs, foi testada através da fabricação do laminado sintético com NMR e posterior fabricação de peças-piloto. Observou-se que o laminado estudado apresentou desempenho similar ao laminado tradicional no que diz respeito aos processos de corte à lamina e costura à máquina. Nas peças-piloto desenvolvidas, os processos de colagem e termoformagem apresentaram resultados satisfatórios, entretanto, algumas possíveis

limitações foram constatadas, tais como a falta de aderência na colagem entre duas lâminas do NMR e a rigidez elevada do contraforte moldado no novo material.

A rigidez apresentada pelo NMR (que pode ser visualizada nos MPM) foi um impeditivo na fabricação do cabedal de um calçado fechado. Entretanto, foi adequada na fabricação do cabedal do chinelo. Para a fabricação dessa mesma peça em um laminado de menor rigidez, seria necessário incluir um material de suporte dentro das tiras do chinelo. O mesmo se observou na fabricação do cinto, no qual o NMR não ficou aparente, agiu como inibidor de elasticidade e auxiliou na estruturação da peça.

O presente estudo apresentou um teste de viabilidade de aplicação, assim, observou-se que o NMR apresenta algumas limitações em relação ao laminado tradicional para alguns processos. Entretanto, essas limitações não impediram a fabricação das peças-piloto produzidas nesse estudo. Assim, é possível concluir que a o uso do NMR na fabricação de laminados para a fabricação de calçados e componentes apresenta, preliminarmente (e apenas com base nos processos aqui analisados), potencial de aplicação nessa área. Sabe-se, entretanto, que para a efetiva validação dessa aplicação são necessários testes complementares, tais como resistência à abrasão, teste de conforto e resistência, teste de fabricação em escala industrial etc. Esses testes não serão aqui abordados por questões de limitação de tempo e recurso, além de estender o conteúdo da pesquisa à uma área distinta.

Dessa forma, o Estudo Prático A desenvolvido representa uma contribuição ao estudo da reciclagem e do design, apresentando um possível caminho para o reprocessamento de escovas de dente multi-material no seu fim-de vida. O estudo demonstrou a possibilidade de se promover o reprocessamento desses produtos, sem a necessidade de separação dos materiais, gerando um material com potencial de aplicação em um novo produto com valor agregado no exato estado em que se encontra, sem a adição de cargas e plastificantes. Assim, partindo dos resultados aqui observados, apresenta-se a seguir o estudo prático complementar, a fim de aprofundar algumas questões.

5 ESTUDO PRÁTICO B (PARTE III)

A Parte III consiste em no Estudo Prático B, a partir do qual se buscou atingir o objetivo específico 7 proposto nessa pesquisa. Para tanto, a reciclagem dos produtos multi-materiais foi reproduzida com base no Estudo Prático A, porém com um volume maior de material e com o objetivo de verificar a influência do tamanho das partículas do material reciclado.

Ao longo do Estudo Prático A, percebeu-se que, para se atingir granulometrias uniformes menores que 0,42 mm pelo método de micronização aqui adotado, diversos ciclos de moagem são necessários, o que torna o processo menos eficiente e gera maiores perdas de material. Por isso, a possibilidade de se trabalhar com um tamanho maior de partículas sem grandes perdas de propriedades é atraente e merece uma investigação. Dessa forma, são apresentados a seguir os materiais utilizados nessa etapa, além da descrição e detalhamento dos procedimentos e métodos aplicados no estudo.

5.1 MATERIAIS E MÉTODOS – ESTUDO PRÁTICO B

5.1.1 Materiais

- 60 escovas de dente multi-materiais idênticas (mesmo modelo e mesmo fabricante).
- Polietileno de baixa densidade linear (PEBDL), com índice de fluidez de 10,5g/10min (folha de dados do material no anexo A).

5.1.1.1 *Condição do material*

As escovas de dente utilizadas no estudo foram obtidas em estado pré-consumo em suas embalagens originais (Figura 53A)². Para o reprocessamento, as mesmas foram removidas das embalagens (Figura 53B), mas os diferentes materiais contidos no produto não foram separados. O PEDBL foi obtido no mercado em forma de pellets, o mesmo está representado na Figura 22A.

² Os produtos foram doados pelo fabricante pois não estavam em condições de serem vendidos, seriam descartados.

Figura 53 - Escovas de dente embaladas (A), prontas para serem reprocessadas (B)



5.1.2 Método

Para uma visualização mais clara dos métodos utilizados, a Figura 54 apresenta as etapas realizadas nesse estudo prático complementar, assim como a relação de cada etapa com os objetivos específicos (apresentados no capítulo 2) propostos nessa pesquisa.

Figura 54 - Parte III: Esquema dos métodos utilizados e relação dos mesmos com os objetivos específicos



5.1.2.1 Identificação dos materiais contidos no produto

A identificação dos materiais poliméricos contidos nas escovas foi realizada através de FTIR, o equipamento utilizado foi um Burker Alpha, ATR ZnSe com resolução de 4cm⁻¹ realizando 64 varreduras por amostra. O referido equipamento pertence ao Laboratório Multiusuário de Análise Térmica (LAMAT) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e está representado na Figura 55.

Para a identificação do material metálico presente no produto foi utilizado um espectrômetro de fluorescência por Raio-X da marca Bruker, modelo S1 Turbo sd (Figura 24B). O referido equipamento pertence ao LdSM/UFRGS.

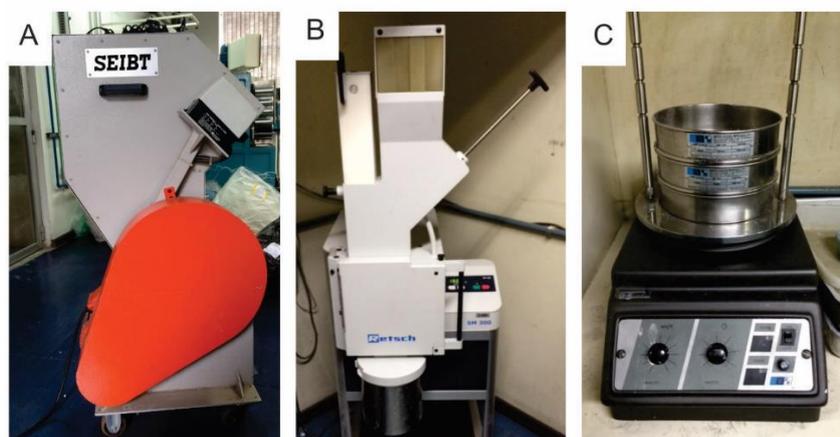
Figura 55 - Equipamento de FTIR utilizado na Parte III do estudo



5.1.2.2 Trituração e Moagem – Obtenção de três granulometrias distintas

A primeira etapa de cominuição do material consistiu na trituração das escovas. A trituração das mesmas foi realizada em um equipamento da marca SEIBT, modelo MGAS27180. O equipamento pertence ao Laboratório de Polímeros Avançados (LPA) da UFRGS (Figura 56A). Para reduzir o tamanho das partículas geradas na trituração, o material foi submetido a três ciclos de moagem em um moinho da marca Retsch, modelo SM300 com rotação de 1.500 rpm. O equipamento utilizado pertence ao Laboratório de Corrosão, Proteção e Reciclagem de materiais (LACOR) da UFRGS e está representado na Figura 56B. No primeiro ciclo de moagem foi utilizada uma tela com abertura de 2mm, no segundo foi utilizada uma tela de 1mm e no terceiro ciclo foi utilizada uma tela com abertura de 0,5mm. Telas com aberturas menores não foram utilizadas para evitar maiores perdas de material.

Figura 56 - Moinhos (A e B) e peneiras vibratórias (C) utilizados na Parte III da pesquisa



O material de granulometria maior (G1) foi obtido após trituração no equipamento SEIBT e o primeiro ciclo de moagem, seguido de separação nas peneiras vibratórias da marca Bertel (Figura 56C) com aberturas de 2 mm e 1mm. Já o material de granulometria mais fina passou pelos três ciclos de moagem descritos, seguidos por separação em peneira de 0,5mm. Esse processo gerou duas granulometrias distintas, conforme demonstra a Tabela 10.

Tabela 10 - Granulometrias geradas

Granulometria	Abertura (mm)
G1	+ 1,0 - 2,0
G2	- 0,5

5.1.2.3 Identificação do tamanho médio das partículas menores que 0,5mm

Para a obtenção de um resultado mais exato, o material com partículas menores que 0,5mm (G2 na Tabela 10) foi submetido a uma distribuição granulométrica em um equipamento CILAS, 1180 com capacidade de medição de partículas de 0,04 a 2500 μm (Figura 57). O Equipamento pertence ao Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da UFRGS.

O material com partículas maiores (G1) não foi submetido à distribuição granulométrica devido às restrições do equipamento, o tamanho das partículas, nesse caso, foi determinado através das peneiras vibratórias, conforme descrito na Tabela 10.

Figura 57 - Equipamento utilizado na distribuição granulométrica



5.1.2.4 Separação dos metais

Os metais identificados nas escovas foram removidos após a moagem³ através de um separador eletrostático Inbras, modelo ESP-14/01S (Figura 58), com rotação de 50 rpm, voltagem de 30kV e 50% de vibração na alimentação. O referido equipamento pertence ao LACOR/UFRGS. Os metais separados não foram utilizados nesse estudo, foram removidos a fim de evitar possíveis complicações ao longo dos processos de extrusão e injeção, bem como para não interferir nas propriedades do material final.

Figura 58 - Separador eletrostático utilizado no estudo



5.1.2.5 Preparação da mistura e Extrusão

A proporção utilizada na mistura do material reciclado com polímero virgem foi de 30% reciclado para 70% virgem. Essa relação foi escolhida com base no Estudo Prático A. Para comparar as diferentes granulometrias obtidas na moagem, foram preparadas duas amostras com polímero virgem, conforme demonstrado na Tabela 11.

Tabela 11 - Composição das amostras 1 e 2

Amostra	Granulometria	Material reciclado (g)	PEBDL virgem (g)
1	G1	150	350
2	G2	150	350

Antes da extrusão o PEBDL virgem e o material micronizado (G1 e G2) foram secos em estufa a 60°C por 24h. A extrusão foi realizada em uma extrusora de rosca simples da marca SEIBT, modelo MR6D59 (Figura 27A – Parte II). O referido

³ Apenas passaram pela separação eletrostática o material G1, já que os metais não passaram pela peneira < 0,5mm.

equipamento pertence à Oficina de Modelos e Protótipos da Faculdade de Arquitetura, Urbanismo e Design/UFRGS. Os parâmetros utilizados foram os mesmos do Estudo Prático A.

Ao final da extrusão o material foi pelletizado em um picotador da marca Ax plásticos modelo AX GRAN. O picotador utilizado pertence à Oficina de Modelos e Protótipos da Faculdade de Arquitetura, Urbanismo e Design/UFRGS.

5.1.2.6 Injeção

As duas amostras obtidas após a extrusão foram injetadas em uma mini injetora da marca Haake, modelo Minijet II. O referido equipamento pertence ao Laboratório de Transformação Mecânica (LDTM) da UFRGS. Para ambas as amostras, os parâmetros utilizados foram os mesmos utilizados no Estudo Prático A (conforme descrito no item 4.1.2.5, ilustrado na Tabela 3). Antes da injeção o material foi seco em estufa por três horas a 80°C.

5.1.2.7 Visualização da morfologia do material injetado

Os corpos de prova injetados foram visualizados em uma Lupa Estereoscópica, marca Olympus, modelo SZX 16 (Figura 59) com o software AnalySIS Start. O referido equipamento pertence ao LdSM/UFRGS. Para uma melhor visualização da dispersão das partículas na matriz, as imagens obtidas na lupa foram vetorizadas no software Corel Draw.

Figura 59 - Lupa Estereoscópica utilizada no estudo



5.1.2.8 caracterização

- Teste de densidade

O teste de densidade foi realizado de acordo com a norma ASTM D792, método B. Assim como no Estudo Prático A, o líquido utilizado foi o álcool etílico. A balança analítica utilizada no teste de densidade está representada na Figura 29C.

- Teste de resistência à tração

O teste de resistência à tração foi realizado de acordo com a norma ASTM D638-14, com corpo de prova modelo V, especificado pela referida norma. A velocidade do ensaio foi 100 mm/min. Foi utilizado um equipamento da marca Shimadzu, modelo EZ-LX (Figura 29A), combinado com o software Trapezium X.

O referido equipamento pertence à Oficina de Modelos e Protótipos da Faculdade de Arquitetura, Urbanismo e Design/UFRGS. Foram tracionados vinte corpos de prova para cada amostra, obtendo-se um valor médio e o desvio padrão para cada uma.

- Calorimetria exploratória diferencial (DSC)

O ensaio de DSC foi realizado nas duas amostras recicladas, em uma amostra do PEBDL virgem (matriz da mistura) e nos três materiais poliméricos que compõem as escovas recicladas nesse estudo (material do corpo, do detalhe e das cerdas). Os ensaios foram realizados em um equipamento da marca TA Instruments (USA, Lukens Drive, New Castle), Q2000. O referido equipamento pertence ao Laboratório Multiusuário de Análise Térmica (LAMAT) da UFRGS e está representado na Figura 60A.

Foram utilizadas panelinhas de alumínio herméticas, produzida pela empresa TA Instruments. O gás nitrogênio foi utilizado com vazão de 50 ml/min. As amostras foram submetidas a três ciclos, conforme especificado na Tabela 12. Para análise de resultados foi considerada a 2ª rampa de aquecimento.

Tabela 12 - Parâmetros utilizados no ensaio de DSC

	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)
1ª Rampa de aquecimento	-90	250
1ª Rampa de resfriamento	250	-90
2ª Rampa de aquecimento	-90	250

- Análise termogravimétrica (TGA)

Assim como no ensaio de DSC, o TGA foi realizado nas duas amostras recicladas, nos materiais que compõem as escova estudadas e no PEBDL utilizado como matriz. Utilizou-se um equipamento da marca TA Instruments (USA, Lukens Drive, New Castle) modelo SDT 600, pertencente ao LAMAT/UFRGS (Figura 60B). Partiu-se da temperatura ambiente (20°C) até 1000°C em uma rampa de aquecimento de 20°C/min. Utilizou-se nitrogênio ultra puro com vazão de 100 ml/min.

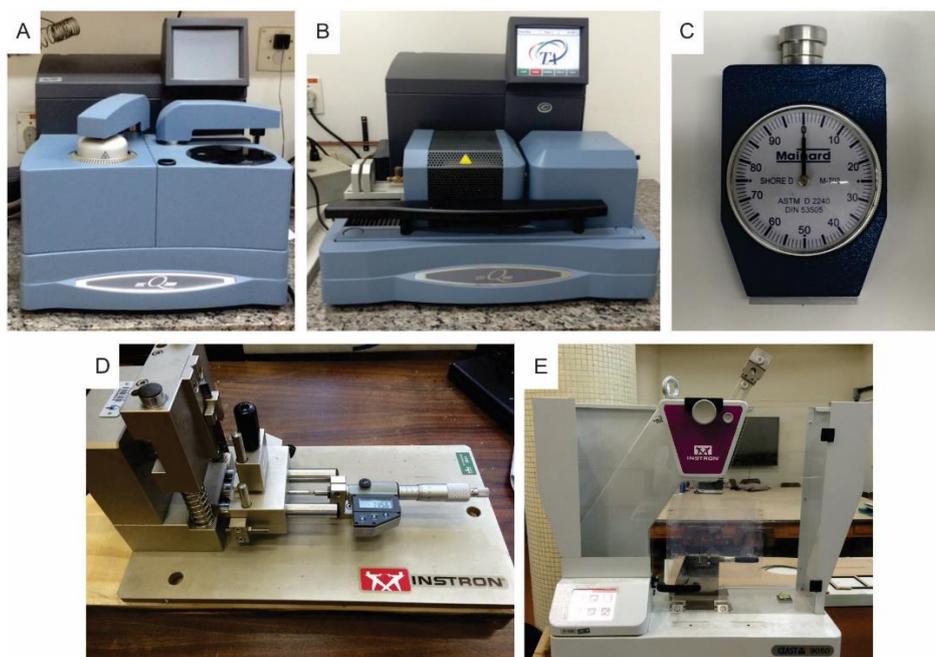
- Dureza Shore D

O teste de dureza foi realizado com base na norma ASTM D2240 tipo Shore D. Foi utilizado um durômetro Shore D da marca Mainard (Figura 60C), o referido equipamento pertence à Universidade Unisinos. Para cada amostra, a dureza foi medida 10 vezes, posteriormente foi calculada a média e o desvio padrão.

- Teste de Impacto Izod

No teste de impacto foram testadas 10 corpos de prova de cada amostra. Os corpos de prova injetados foram entalhados em um entalhador manual da marca Instron (Figura 60D), de acordo com a norma ASTM D256. O ensaio foi realizado em um equipamento da marca Instron, CEAST 9050, com martelo de 5.5 J (Figura 60E).

Figura 60 - Equipamento de DSC (A), de TGA (B), durômetro Shore D (C), entalhador manual (D) e equipamento de impacto Izod (E) utilizados nesse estudo



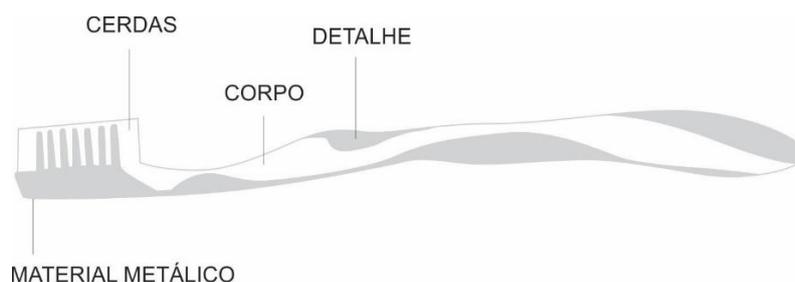
5.2 RESULTADOS DO ESTUDO PRÁTICO COMPLEMENTAR

5.2.1 Identificação dos materiais contidos no produto

A composição do produto utilizado nesse estudo era descrita na embalagem do mesmo nos seguintes termos: “Composição: resinas termoplásticas, nylon, ancora metálica e pigmentos”. Para obter informações mais específicas, a identificação dos materiais poliméricos contidos no produto foi realizada através de FTIR.

Assim como no Estudo Prático A, foram analisados três pontos correspondentes a diferentes materiais poliméricos (Figura 61). O material metálico utilizado para a fixação das cerdas foi identificado através de espectrômetro de fluorescência por Raio-X.

Figura 61 – Partes das escovas de dente utilizadas no estudo



A partir das análises, identificou-se que os materiais poliméricos presentes nas escovas analisadas são semelhantes aos dos produtos utilizados no Estudo Prático A (que apontou a presença de PP, EPDM e PA no produto). A única exceção foi o material metálico, identificado aqui como uma liga de alumínio. Os espectros gerados nas análises de FTIR conduzidas no corpo, nos detalhes e nas cerdas estão representados nas Figuras 62, 63 e 64, respectivamente. A identificação das principais bandas pode ser visualizada nas Tabelas 13,14 e 15.

Tabela 13 - Identificação das bandas do espectro de FTIR do corpo do produto

Banda (cm ⁻¹)	Grupo funcional correspondente	Fonte
2948.7	Deformação axial assimétrica do CH ₃	Silverstein et al., 2007
2917 e 2868.9	Deformação do CH ₂	Nogueira et al., 2007
1451	Deformação angular simétrica no plano do CH ₂	Silverstein et al., 2007
1375.4	Deformação angular simétricas no plano do CH ₃	Mitra et al., 2006
1166.9	Estiramento de ligações C-C	Carvalho et al., 2007
890	Deformação angular do CH	Carvalho et al., 2007

*Elaborado com base no Estudo Prático A

Figura 62 - Espectro de FTIR do material do corpo do produto analisado

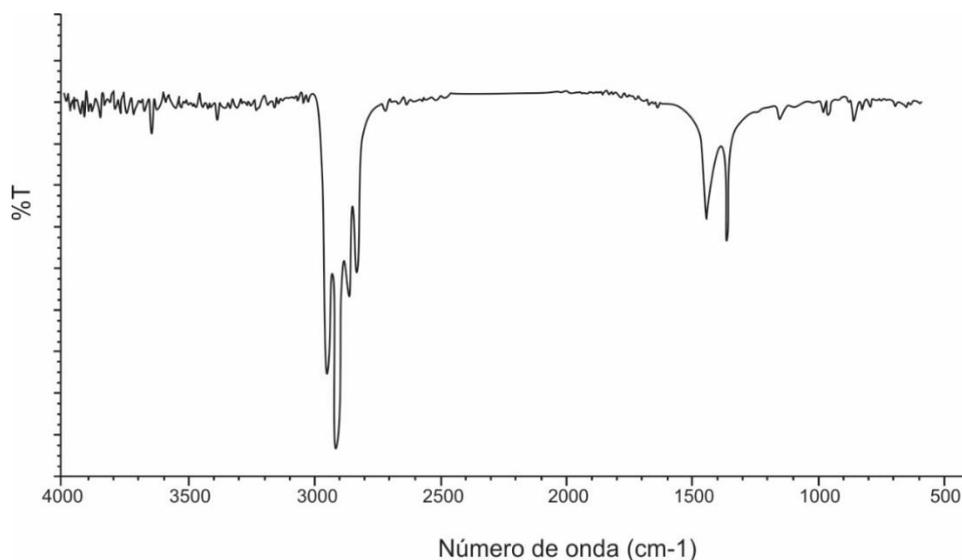


Tabela 14 - Identificação das bandas do espectro de FTIR do detalhe do produto

Banda (cm ⁻¹)	Grupo funcional correspondente	Fonte
2919.7	Deformação axial assimétrica do CH ₂	Gunasekaran et al., 2007
2852	Deformação axial simétrica do CH ₂	Silverstein et al., 2007
2950.9	Deformação axial assimétrica do CH ₃	Silverstein et al., 2007
1450	Deformação angular simétrica no plano do CH ₂	Silverstein et al., 2007
1376	Deformação angular simétricas no plano do CH ₃	Mitra et al., 2006
720	Deformação angular assimétrica no plano do CH ₂	Mitra et al., 2006

*Elaborado com base no Estudo Prático A

Figura 63 - Espectro de FTIR do material do detalhe do produto analisado

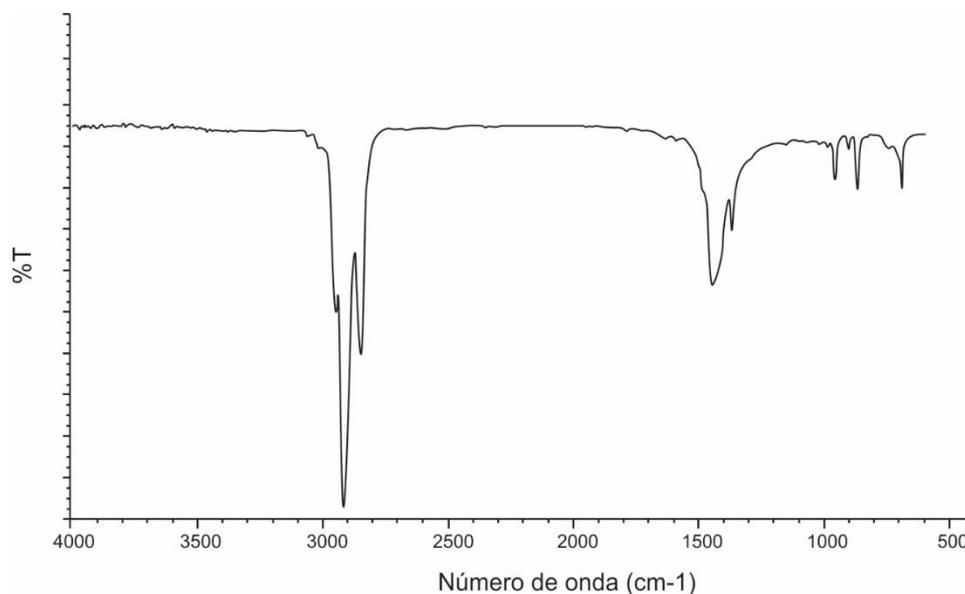
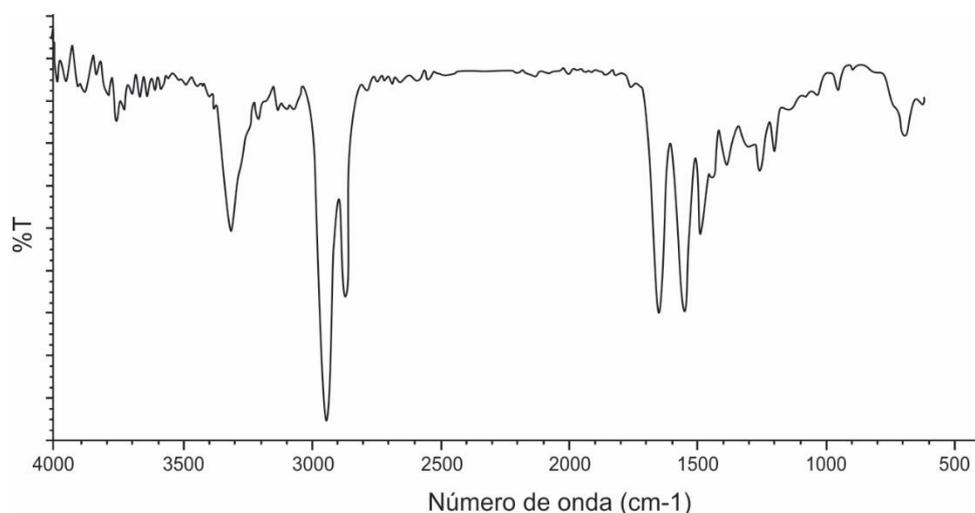


Tabela 15 - Identificação das bandas do espectro de FTIR das cerdas do produto

Banda (cm ⁻¹)	Grupo funcional correspondente	Fonte
3300	Deformação axial do N-H	Evora et al., 2002
2923.5	Deformação axial assimétrica do CH ₂	Silverstein et al., 2007
2853	Deformação axial simétrica do CH ₂	Silverstein et al., 2007
1651.2	Deformação axial de C=O (Amida I)	Evora et al., 2002
1552	Deformação angular de N-H (Amida II)	Evora et al., 2002

*Elaborado com base no Estudo Prático A

Figura 64 - Espectro de FTIR do material das cerdas do produto analisado



O material metálico presente no produto, cuja função consiste na fixação das cerdas no corpo da escova (representado na Figura 65), foi identificado como um Alumínio. Os elementos que compõe a liga, assim como a quantidade (%) estão representados na Tabela 16.

Figura 65 - Peças metálicas presentes no corpo da escova em relação ao material triturado (A) e detalhe dos metais (B)

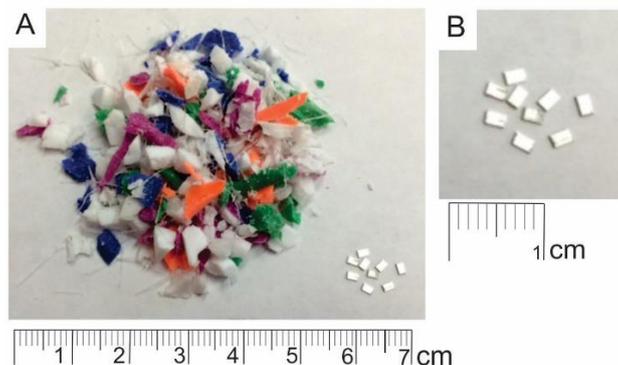


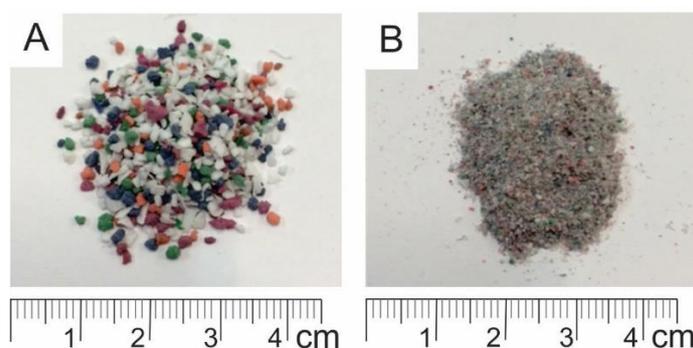
Tabela 16 - Composição da liga de alumínio identificada pelo equipamento

Elemento	Al	Si	Cr	Fe	Cu
Quant. (%)	96,9 ± 2,16	2,09 ± 0,8	0,29 ± 0,05	0,47 ± 0,11	0,21 ± 0,05

5.2.2 Obtenção das duas granulometrias e identificação do tamanho das partículas geradas

Após os ciclos de moagem o material foi submetido às peneiras vibratórias a fim de se obter duas granulometrias distintas. O material resultante da separação pode ser visualizado na Figura 66.

Figura 66 - Material separado nas peneiras vibratórias de acordo com a granulometria: G1(A) e G2 (B)



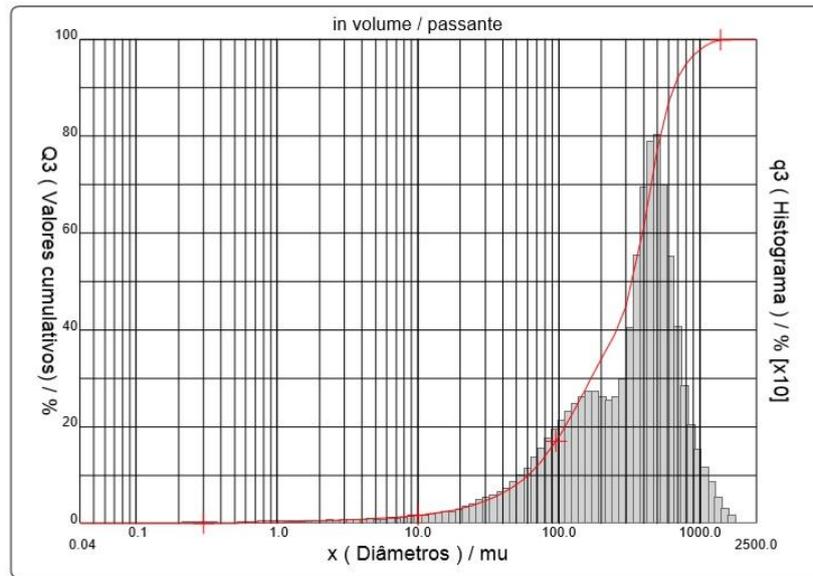
Após a separação nas peneiras vibratórias, a granulometria menor que 0,5mm (G2) foi submetida a uma distribuição granulométrica para a obtenção de resultados mais exatos em relação à média do tamanho das partículas geradas.

O resultado da distribuição granulométrica apontou que o diâmetro médio das partículas é de 0,348 mm. O histograma, apresentado na Figura 67, representa a distribuição granulométrica da amostra, e a tabela 17, os diâmetros médios.

Tabela 17 - Diâmetros médios do material < 0,5mm (G3)

Diâmetro a 10%	60,33 μ m
Diâmetro a 50%	328,11 μ m
Diâmetro a 90%	656,76 μ m
Diâmetro Médio	348,52 μm

Figura 67 - Histograma da distribuição granulométrica do material < 0,5mm (G2)



5.2.3 Visualização da morfologia do material após a injeção

A Figura 68 ilustra o material resultante da injeção de cada amostra. Para uma melhor comparação entre a dispersão das amostras estudadas, as imagens vetorizadas são apresentadas na figura 69.

Figura 68 - Amostra 1 (1A – 1C) e Amostra 2 (2A – 2C) após os processos de extrusão e injeção

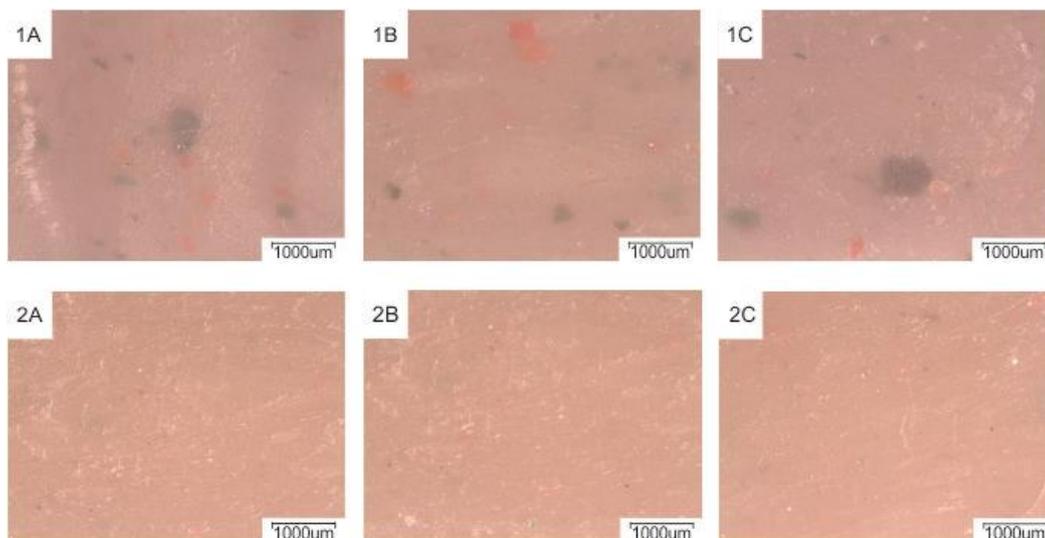
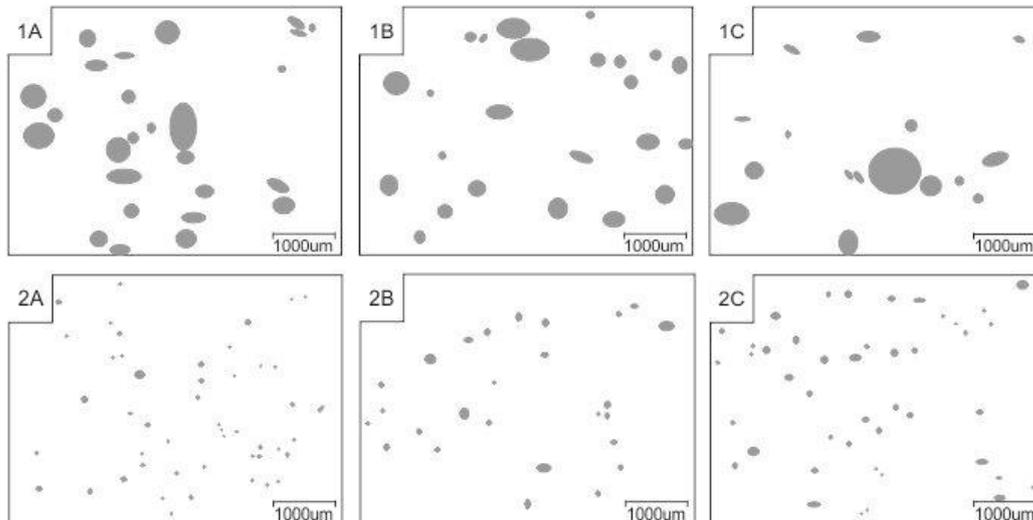


Figura 69 - Vetorização das imagens geradas na lupa da amostra 1 (1A – 1C) e amostra 2 (2A – 2C)



Na amostra 1 as fases distintas são facilmente identificadas em função do tamanho das partículas. Já na amostra 2 a visualização das partículas dispersas na matriz ficou mais clara após a vetorização. Sabe-se que alcançar uma homogeneidade satisfatória em polímeros reciclados, especialmente quando há mistura de diferentes polímeros e cores é difícil, e algumas vezes até impossível devido às diferenças de viscosidade e ponto de fusão entre os polímeros da mistura (GOODSHIP, 2007; LA MANTIA; SCAFFARO, 2014).

No caso estudado, a presença de EPDM pode ter gerado as partículas coloridas que aparecem dispersas na matriz. Além disso, observa-se no produto estudado que a parte colorida corresponde, justamente, ao material no qual se constatou a presença de EPDM.

5.2.4 Caracterização

- Ensaio Mecânicos

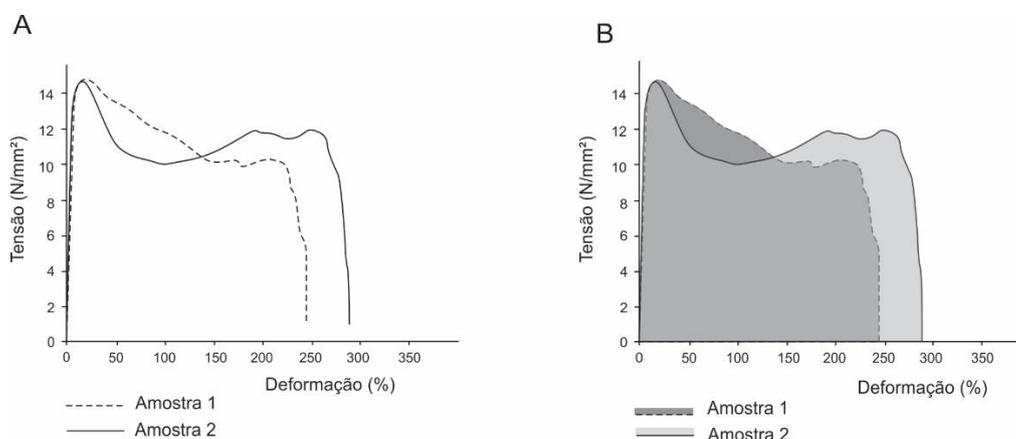
De maneira geral, os testes mecânicos e o teste de densidade não apontaram diferenças significativas entre os resultados das amostras analisadas. Os resultados dos testes de densidade, dureza Shore D, tração e impacto Izod podem ser visualizados na tabela 18.

Tabela 18 – Resultados dos testes mecânicos e de densidade

	Amostra 1	Amostra 2
Densidade (g/cm³)	0,909 ± 0,0028	0,922 ± 0,0023
Dureza (Shore D)	52,4 ± 2,83	50,9 ± 2,68
Tensão de Escoamento YP (MPa)	14,84 ± 0,52	14,71 ± 0,43
Módulo de Young (GPa)	0,46 ± 0,04	0,50 ± 0,02
Deformação (%)	241,9 ± 43,95	287,75 ± 23,99
Resistência ao Impacto Izod (kJ/m²)	50,321 ± 6,43	54,99 ± 7,17

Em relação aos testes de densidade e dureza, observa-se que a variação entre as amostras 1 e 2 é muito pequena, se considerado o desvio padrão tal diferença se torna não significativa. No ensaio de tração, observa-se que a amostra 2 apresentou uma média levemente mais alta do que a amostra 1 em relação à deformação, entretanto, considerando o desvio padrão, percebe-se que tal diferença não pode ser considerada significativa. Na tensão de escoamento e no módulo de Young, não há variação significativa entre as amostras estudadas. A tenacidade, representada pela área sob as curvas dos gráficos, é apresentada na Figura 70B. As curvas de *Tensão x Deformação* são apresentadas na Figura 70A.

Figura 70 - Curvas Tensão x Deformação das amostras 1 e 2 (A) e comparativo de tenacidade (B)



Da mesma forma, o ensaio de impacto Izod demonstrou que houve pouca variação entre as amostras estudadas. A média apresentada pela amostra 2 foi levemente superior à da amostra 1, entretanto, considerando o desvio padrão, observa-se que tal diferença não é significativa. Além disso, observou-se que nenhum dos corpos de prova utilizados quebrou durante a realização do ensaio. Esse resultado já era esperado, uma

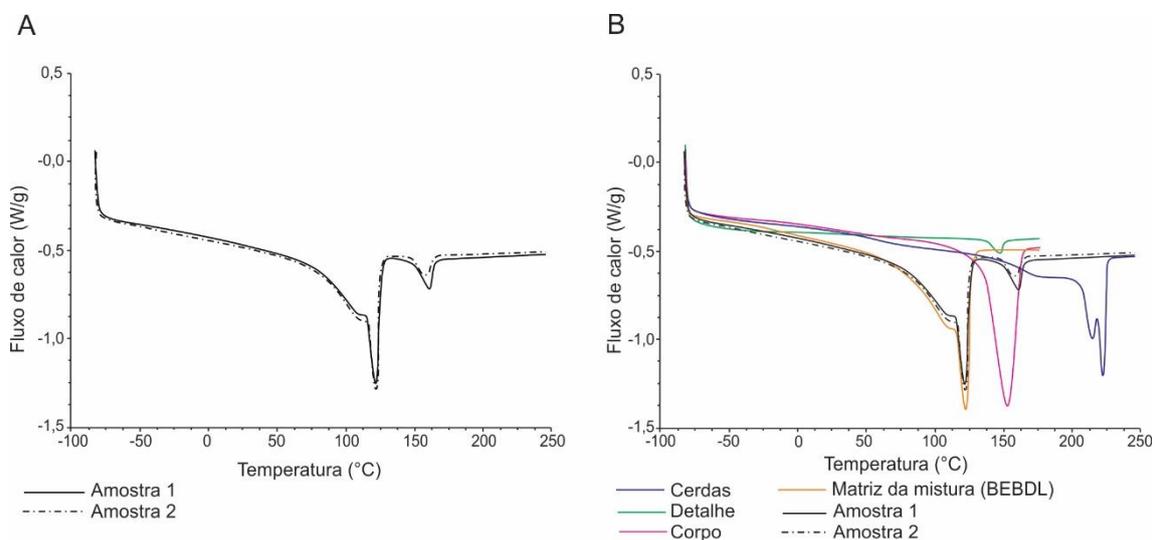
vez que o mesmo ocorre com corpos de prova de PEBDL, material que constituía a matriz da mistura (70%).

A partir dos resultados apresentados, é possível concluir que, com os parâmetros utilizados, o tamanho das partículas não influenciou o comportamento das amostras em relação às propriedades aqui apresentadas. O motivo pelo qual isso ocorre deve ficar mais claro após as análises térmicas apresentadas a seguir.

- Ensaio Térmico

Em relação ao ensaio de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), a Figura 71A demonstra que não houve variação significativa entre as amostras recicladas analisadas. A Amostra 1 apresentou fusão em 125,41°C e a Amostra 2 em 124,88°C. As amostras apresentaram ainda um segundo pico ao redor de 160°C (mais precisamente 165,92°C na amostra 1 e 163,49°C na amostra 2), que deve estar relacionado à presença de PP (material presente no corpo das escovas), conforme demonstra a Figura 71B. Dessa forma, trata-se de uma mistura não compatível termodinamicamente.

Figura 71 - Curvas de DSC comparativo entre as amostras 1 e 2 (A) e comparativo entre todo materiais analisados (B)



A Figura 71B apresenta um comparativo entre as amostras estudadas e os diferentes materiais que compõem a mistura. Observa-se que as amostras 1 e 2 acompanharam a curva do PEBDL, o que já era esperado, uma vez que o mesmo constitui a matriz da mistura (70%). A presença do PP deve ter influenciado na formação do pico ao redor de 160°C, já a fusão da PA (material das cerdas da escova)

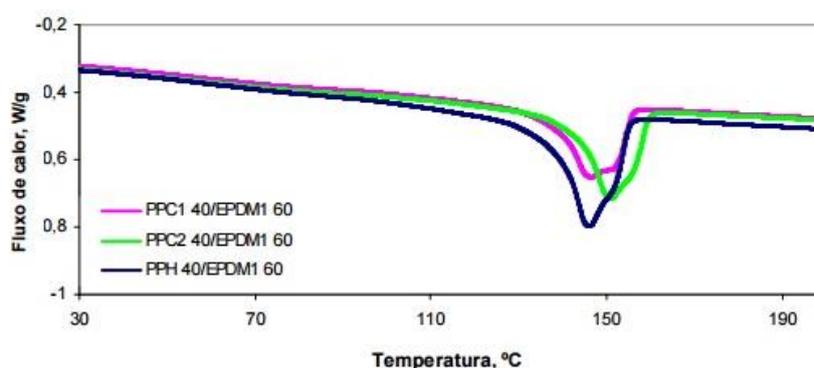
não é percebida nas curvas das amostras analisadas. Possivelmente, esse resultado é decorrente de uma pequena quantidade de cerdas presente na mistura, em comparação com os demais materiais.

A realização do ensaio de DSC possibilitou a visualização de um pico de fusão (em 157°C) no material do detalhe da escova estudada (Figura 71B). Assim, é possível concluir que o material em questão não pode ser o elastômero EPDM puro, caso contrário, não seria possível a visualização de um ponto de fusão, uma vez que o mesmo é um elastômero termofixo (CES edupack). Assim, possivelmente, o material do detalhe é um elastômero termoplástico (TPE).

Acredita-se que o material do detalhe das escovas seja um elastômero termoplástico vulcanizado (TPE-V) composto por EPDM e PP. Tal hipótese se baseia, inicialmente, em estudos (MARKARIAN, 2004; DONDERO et al., 2009) e patentes (CALABRESE, 2003; HOHLBEIN, 1998) que indicam que é comum a aplicação do TPE-V de EPDM e PP em escovas de dente.

A Figura 72 ilustra uma curva de DSC para três diferentes tipos de TPE-V (nos quais se alterou o *grade* do PP utilizado na mistura) à base de EPDM (60%) e PP (40%), analisadas no estudo de Gheller Junior (2011). Observa-se que há um pico de fusão ao redor de 150°C, conforme observado na amostra do detalhe da escova analisada no presente estudo. Tal resultado condiz com a hipótese levantada.

Figura 72 - Curvas de DSC para três tipos de TPV



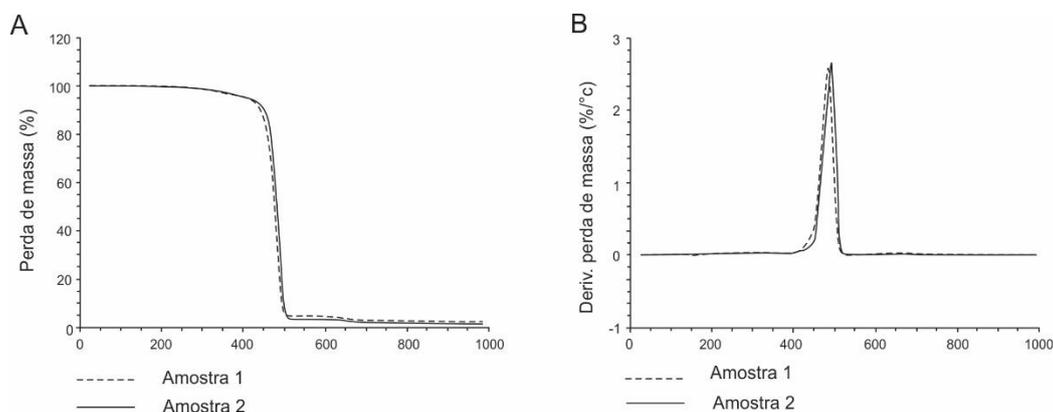
Fonte: Gheller Junior, 2011

Partindo dessa hipótese, acredita-se que a identificação desse material através do FTIR não foi eficiente devido à presença de bandas que são comuns tanto ao PP quanto ao EPDM, como é o caso da região ao redor de 2920 e 1450 cm^{-1} (referentes a deformações do CH_2) identificadas no espectro do detalhe do produto.

A verificação mais exata da composição do material do detalhe do produto poderia ser realizada através da utilização do TGA acoplado ao FTIR, o que se apresenta como sugestão para trabalhos futuros, uma vez que no presente estudo não foi possível o acesso ao referido equipamento.

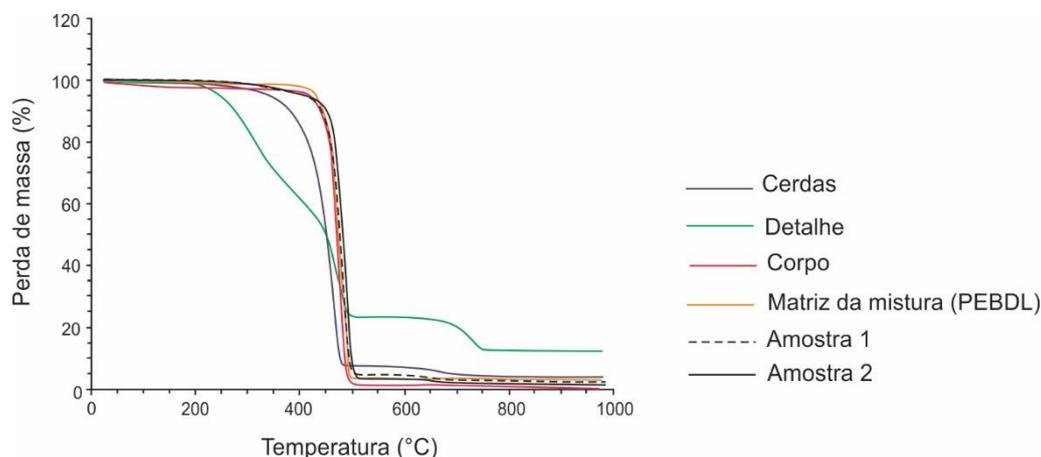
A Figura 73A representa um comparativo do resultado da Análise Termogravimétrica (TGA) entre as amostras 1 e 2. Observa-se que as amostras são termicamente estáveis até 380°C, aproximadamente. A partir da curva DTG para as amostras 1 e 2 (Figura 73B), observa-se que a decomposição dos materiais das amostras ocorre em 481,79 °C e 486,55 °C, respectivamente. Ou seja, não há variações significativas em relação à degradação e perda de massa das amostras.

Figura 73 - comparativo das curvas TG das amostras recicladas (A) e comparativo das curvas DTG para as amostras recicladas (B)



Assim como no DSC, observou-se que as amostras recicladas apresentam comportamento muito similar ao PEBDL em relação à perda de massa, conforme demonstra a Figura 74.

Figura 74 - Comparativo entre as curvas TG de todos os materiais da mistura



Após a obtenção dos resultados das análises térmicas, foi possível perceber que, provavelmente, o material do detalhe do produto é um TPE-V, e não um elastômero termofixo, como se esperava inicialmente. Isso pode explicar o fato de não haver influência significativa entre o tamanho das partículas analisadas. Uma vez que todos os materiais da mistura são termoplásticos, eles fundem ao longo dos processos de extrusão e injeção, o que torna indiferente o tamanho das partículas inicialmente utilizadas.

Salienta-se que foi observada a presença de partículas coloridas dispersas na mistura, o que deve estar associado à presença de uma pequena quantidade de EPDM presente no TPE-V, utilizados no material do detalhe do produto. Entretanto, a observação da morfologia demonstrou que a fase dispersa está bem distribuída na matriz, em ambas as amostras, o que também influencia nas propriedades mecânicas do material.

5.3 DISCUSSÃO DO ESTUDO PRÁTICO B

O Estudo Prático B foi realizado com o objetivo de verificar a influência do tamanho das partículas das escovas de dente recicladas nas propriedades do material final. Nesse sentido, as análises demonstraram que para o material estudado, considerando os parâmetros específicos utilizados, não houve variações significativas nos resultados apresentados pelas amostras 1 e 2. Portanto, não é possível afirmar que há influência do tamanho das partículas nas propriedades aqui testadas. Constatou-se ainda que esse resultado, provavelmente, está relacionado com o fato de todos os polímeros presentes na mistura apresentarem comportamento termoplástico.

Dessa forma, o Estudo Prático B demonstrou que é viável tecnicamente promover a reciclagem de escovas de dente multi-materiais sem a necessidade do processo de micronização. É possível obter um material final com propriedades semelhantes às do material reciclado por micronização a partir da reciclagem mecânica em uma granulometria $<2 >1$ mm, o que se obtém facilmente com apenas um ciclo de moagem seguido por separação em peneiras vibratórias. Tal resultado representa um avanço em relação à utilização do processo de micronização, uma vez que se reduz o tempo do processo (o que reflete em redução de custo e consumo energético) e a quantidade de material perdido ao longo da moagem.

Assim, o presente estudo apresenta uma contribuição importante no estudo da reciclagem e do ecodesign, uma vez que demonstrou a viabilidade de reprocessamento de produtos multi-materiais por meio de processo tradicional sem a necessidade de separação dos materiais do produto, gerando um material final com potencial de aplicação em novos produtos com valor agregado.

6 CONCLUSÃO

Sabe-se que a situação ideal em relação ao desenvolvimento de produtos sustentáveis é a utilização dos preceitos do ecodesign, dentre eles, o DfD. Entretanto, ainda estamos longe de atingir esse ideal de forma plena. Nesse sentido, a presente pesquisa demonstrou a viabilidade técnica de se promover a reciclagem de produtos multi-materiais sem a necessidade de separação prévia. Assim, aponta-se um possível caminho para a minimização dos impactos ambientais negativos causados pelo acúmulo de resíduos gerados por produtos que não foram projetados para a desmontagem. Além disso, tal solução pode ser considerada um estímulo ao desenvolvimento da indústria da reciclagem, setor que cresce em participação na economia nacional.

O presente estudo abordou ainda o potencial de utilização do novo material reciclado (NMR) em aplicações com valor agregado. O uso da metodologia de seleção de aplicações por meio dos mapas de seleção de materiais se mostrou adequado para a análise pretendida, o referido método possibilitou a visualização do setor calçadista como uma potencial área de aplicação para o NMR. O estudo propôs ainda testes de viabilidade de utilização do NMR na aplicação selecionada. Os testes realizados indicaram que o NMR apresentou pequenas limitações em relação à falta de aderência entre duas lâminas de NMR na colagem e na fabricação de peças específicas de calçados (o cabedal fechado, por exemplo), especialmente devido a sua rigidez elevada para tal aplicação. Entretanto, o estudo demonstrou que o NMR aceitou a maior parte dos processos utilizados na produção calçadista e apresentou bom potencial de utilização como inibidor de deformação em cintos e como material para palmilha de montagem e em tiras para chinelos. O estudo aponta ainda para a viabilidade de se promover a reciclagem de escovas de dente multi-materiais, sem separação prévia, pelo processo tradicional sem a necessidade da micronização, com a geração de um NMR com potencialidade de aplicação em um novo produto com valor agregado.

Apresentados os principais resultados e conclusões das análises conduzidas, cabe salientar as inovações e contribuições científicas que a presente tese gerou. A pesquisa apresentou conteúdo inovador, uma vez que propôs um processo de reciclagem de diferentes materiais misturados, o que não é usualmente praticado no meio científico, conforme demonstrou a revisão bibliográfica. A pesquisa inova ainda na utilização alternativa do método de seleção de materiais por meio de mapas de propriedades de

materiais na busca por potenciais áreas de aplicação para um novo material reciclado, que se mostrou adequada e gerou resultados satisfatórios. Destaca-se ainda o caráter interdisciplinar do estudo que se apropriou de conhecimentos procedentes do design, da ciência de materiais e da qualidade ambiental. Assim, destaca-se que um dos resultados gerados no estudo foi a apresentação de diretrizes gerais para orientar o processo de reprocessamento de multi-materiais e a seleção de aplicações para o material resultante.

Considera-se uma importante contribuição científica o fato de o presente estudo propor um caminho alternativo como solução a curto prazo para o problema de acúmulo de resíduos sólidos, como é o caso das escovas de dente estudadas. Essa solução repercute de forma positiva no que diz respeito à evolução sustentável de produtos e uso de materiais. Conforme destacado ao longo da revisão bibliográfica, os produtos multi-materiais co-injetados apresentam diversas vantagens do ponto de vista de produção e de competitividade, portanto, a solução apresentada vem ao encontro da tendência atual observada de desenvolvimento desse tipo de produto. Enquanto não se atinge o nível ideal de desenvolvimento de produtos que consideram o DfD e o DfR, o presente estudo apresenta soluções tecnicamente viáveis a curto prazo para o fim de vida dos multi-materiais co-injetados.

7 TRABALHOS FUTUROS

O presente estudo indicou um possível caminho para o reprocessamento e reutilização de produtos multi-materiais. A partir dos resultados aqui apresentados com as escovas de dente, é possível propor a extensão desse estudo para outros produtos que apresentem dificuldades semelhantes de reciclagem ao fim de sua vida útil.

Considera-se também a possibilidade de aprofundamento do teste de viabilidade da aplicação do NMR no setor calçadista. Seria interessante a fabricação de novas peças por meio da fabricação industrial seguida por testes de usabilidade, conforto e desgaste do produto.

ANEXO A – FOLHA DE DADOS PEDBL



Folha de Dados

Revisão 1 (Abr/15)

Polietileno Linear de Baixa Densidade HF0131XP
Descrição:

A resina HF0131XP é um Polietileno de Baixa Densidade Linear com propriedades específicas para filmes tubulares. Possui ótima processabilidade, além de conferir boas propriedades mecânicas, solda e rigidez.

Aplicação:

Filmes para hambúrguer.

Processo:

Extrusão de filmes tubulares.

Propriedades de Controle:

	Método ASTM	Unidade	Valor
Índice de Fluidez (190°C/21,6Kg)	D 1238	g/10 min	10,5
Densidade	D 1505	g/cm ³	0,937

Propriedades Típicas:

Propriedades de referência do filme soprado^a

	Método ASTM	Unidade	Valor
Resistência ao Rasgo Elmendorf (DM/DT)	D 1922	gF	5/960

(a) Filme de 20 µm de espessura, processado em extrusora de 40mm de diâmetro de matriz com razão de sopro de 4:1. (DM = Direção de Extrusão e DT = Direção Transversal à Extrusão).

Recomendações de Processamento:

Perfil de temperatura: 180 a 210°C

Observações Finais:

- Esta resina atende à regulamentação FDA (Food and Drug Administration) para polímeros olefinicos do CFR 21 seção 177.1520, vigente na data de publicação desta especificação. Os aditivos presentes são sancionados por regulamentação apropriada do FDA. As informações aqui contidas são dadas de boa fé, indicando valores típicos obtidos em nossos laboratórios, não devendo ser consideradas como absolutas ou como garantia. Apenas as propriedades e os valores que constam do certificado de qualidade devem ser considerados como garantia do produto.
- Em algumas aplicações, a Braskem tem desenvolvido resinas *tailor-made* para alcançar características específicas.
- Em caso de dúvida na utilização ou para discutir outras aplicações, entre em contato com a Área de Serviços Técnicos.
- Para informações de segurança, manuseio, proteção individual, primeiros socorros e disposição de resíduos, consultar a FISPQ – Folha de Informações de Segurança de Produtos Químicos. Número de registro no CAS: 25213-02-9.
- Os valores constantes nesse documento poderão sofrer alterações sem comunicação prévia da Braskem.
- A Braskem não recomenda o uso desse produto para fabricação de embalagens, peças ou qualquer outro tipo de produto, que será utilizado para o armazenamento ou contato com soluções parenterais ou que terá qualquer tipo de contato interno com o corpo humano.
- As informações aqui contidas cancelam as anteriormente emitidas para este produto.
- Esta resina não contém a substância Bisfenol A (BPA, CAS#80-05-7) em sua composição.

ANEXO B – PRODUÇÃO DECORRENTE DA TESE

ARTIGOS PUBLICADOS EM PERIÓDICO

ASHTON, E. G.; KINDLEIN JUNIOR, W.; CÂNDIDO, L. H. A.; DEMORI, R.; ROBINSON, L. C.; MAULER, R. Design, materiais e sustentabilidade: micronização de produto multi-material visando sua reciclagem. **DaPesquisa**. 10(14):145-162, 2015. ISSN: 1808-3129.

ASHTON, E. G.; KINDLEIN JUNIOR, W.; DEMORI, R.; CÂNDIDO, L. H. A.; MAULER, R. Recycling polymeric multi-material products through micronization. **Journal of Cleaner Production**. 116:268-278, 2016.

APRESENTAÇÃO EM CONGRESSO E PUBLICAÇÃO DE RESUMO EM ANAIS

ASHTON, E. G.; KINDLEIN JUNIOR, W.; CÂNDIDO, L. H. A.; DEMORI, R.; ROBINSON, L. C.; MAULER, R. Design, materiais e sustentabilidade: micronização de produto multi-material visando sua reciclagem. **IDEMI 2015: International Conference on Design, Engineering, Management for Innovation**. Florianópolis, SC, Brasil, de 07 a 10 de outubro de 2015.

REFERÊNCIAS

- ADVANI, S.; HSIAO, K. **Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)**. Philadelphia: Woodhead Publishing, 2012.
- AGUADO, J.; SERRANO, D. **Feedstock Recycling of Plastic Wastes**. Royal Society of Chemistry: Cambridge, 1999.
- AKBULUT, H.; GÜRER, C. Use of aggregates produced from marble quarry waste in asphalt pavements. **Building and Environment**. 42(5):1921–1930, 2007. DOI 10.1016/j.buildenv.2006.03.012.
- ALLWOOD, J.; CULLEN, J. **Sustainable materials with both eyes open**. Cambridge, UIT Cambridge, 2012. Disponível em: www.withbotheyesopen.com.
- ALMEIDA, C. M. V. B.; RODRIGUES, A. J. M.; BONILLA, S. H.; GIANNETTI, B. F. Emergy as a tool for ecodesign: evaluating materials selection for beverage packages in Brazil. **Journal of Cleaner Production**. 18(1):32-43, 2010. DOI 10.1016/j.jclepro.2009.03.019.
- ANDRADE, J. E. P.; CORRÊA, A. R. **Panorama da Indústria Mundial de Calçados, com Ênfase na América Latina**. BNDES Setorial. 13:95-126. 2001. Disponível em: http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2724/1/BS%2013%20Panorama%20da%20indústria%20mundial_P.pdf
- ANTUNES, A. (organizadora). **Setores da Indústria Química Orgânica**. E-papers: Rio de Janeiro, 2007.
- ASHBY, M. F.; CEBON, D. Materials selection in mechanical design. **Le Journal de Physique IV**. 3(C7):C7-1–C7-9, 1993.
- ASHBY, M. F. Multi-objective optimization in material design and selection. **Acta Materialia**. 48:359-369, 2000.
- ASHBY, M. F. Drivers for material development in the 21st century. **Progress in Materials Science**. 46:191-199, 2001.
- ASHBY, M. F.; JOHNSON, Kara. **Materials and Design: The art and science of material selection in product design**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.
- ASHBY, M. F.; BRÈCHET, Y. J. M. Designing hybrid materials. **Acta Materialia** 51:5801–5821, 2003.
- ASHBY, M. F. **Material and Process Selection Charts**. The CES Edupack resource booklet 2. Cambridge University, 2009. Disponível em: http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/2_materials-charts-2009.pdf
- ASHBY, M. F. **Materials Selection in Mechanical Design**. Oxford: Elsevier, 2011.
- ASHBY, M. F.; SHERCLIFF, H.; CEBON, D. **Materials, engineering, Science, processing and design**, third edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014.
- ASHTON, E. G.; KINDLEIN JUNIOR, W.; CÂNDIDO, L. H. A.; DEMORI, R.; ROBINSON, L. C.; MAULER, R. Design, materiais e sustentabilidade: micronização de produto multi-material visando sua reciclagem. **DaPesquisa**. 10(14):145-162, 2015. ISSN: 1808-3129.
- ASHTON, E. G.; KINDLEIN JUNIOR, W.; DEMORI, R.; CÂNDIDO, L. H. A.; MAULER, R. Recycling polymeric multi-material products through micronization. **Journal of Cleaner Production**. 116:268-278, 2016.

ASSADOURIAN, E. Transforming Cultures: From Consumerism to Sustainability. **Journal of Macromarketing**. 30: 186, 2010.

AYYER, R.; ROSENMYER T.; SCHEREIBER W.; COLTON J. Effects of Micronized Rubber Powders on Structure and Properties of Polypropylene Composites. **Waste Biomass Valor**. 4:65-71, 2013. DOI 10.1007/s12649-012-9166-y.

ASHORY, A.; NOURBAKHS, A. Characteristics of wood–fiber plastic composites made of recycled materials. **Waste Management**. 29(4):1291-1295, 2009. DOI 10.1016/j.wasman.2008.09.012.

BACK, D. Rapid prototyping or rapid production? 3D printing processes move industry towards the latter. *Assembly Automation*. 23(4):340–345. 2003. DOI 10.1108/01445150310501190.

BAECHLER, C.; DE VUONO, M.; PEARCE, J. M. Distributed recycling of waste polymer into RepRap feedstock. **Rapid Prototyping Journal**. 19(2):118-125. 2012. DOI:http://dx.doi.org/10.1108/13552541311302978.

BASIRE, C. **Recycling polyamide airbags**. US 20130150514 A1, 2013.

BAXTER, M. **Projeto de Produto: guia prático para o design de novos produtos**. São Paulo: Edgard Blucher, 2000.

BERTIN, S.; ROBIN, J. Study and characterization of virgin and recycled LDPE/PP blends. **European Polymer Journal**. 38:2255-2264, 2002. DOI 10.1016/S0014-3057(02)00111-8.

BOOTHROYD, G.; DEWHURST, P.; KNIGHT, W. A. **Product Design for Manufacture and Assembly**. 3rd edition, CRC Press: Florida, 2011.

BONSIEPE, G. **Design: como prática de projeto**. Edgard Blucher: São Paulo, 2012.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de Agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da república Federativa do Brasil**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicaocompilado.htm

BÜRDECK, B. E. **Design: History and practice of product design**. Basel: Publishers of Architecture, 2005.

BOVEA, M. D.; VIDAL, R. Materials selection for sustainable product design: a case study of wood based furniture eco-design. **Materials and Design**. 25, p. 111–116, 2004.

CALABRESE, G. Unilever Home & Personal Care USA Division of Conopco Inc. Toothbrush. **US6510575 B2**. 2003.

CALLISTER, W. D. Jr; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. Oitava edição. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CAMPOS, H. K. T. Recycling in Brazil: Challenges and prospects. **Resources, Conservation and Recycling**. 85:130-138, 2014.

CÂNDIDO, L.; KINDLEIN, W.; DEMORI, R.; CARLI, L.; MAULER, R.; OLIVEIRA, R. The recycling cycle of materials as a design Project tool. **Journal of Cleaner Production**. 19:1438-1445, 2011. DOI 10.1016/j.jclepro.2011.04.017.

CANEVAROLO JR., S. V. **Ciência dos Polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**, 2ª edição. São Paulo: Artliber, 2006.

CAPES. **Documento de Área 2013** – Arquitetura, Urbanismo e Design. Disponível em: https://www.capes.gov.br/images/stories/download/avaliacaotrienal/Docs_de_area/Arquitetura_Urbanismo_e_Design_doc_area_e_comiss%C3%A3o_16out.pdf Acessado em: 28/04/2015.

CARDOSO, R. **Uma introdução à história do design**. 3ª edição, Blucher: São Paulo, 2008.

CARVALHO, G. M. X., MANSUR, H. S., VASCONCELOS, W. L., ORÉFICE, R. **L.Obtenção de compósitos de resíduos de ardósia e polipropileno**. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*. **17(2):98-103, 2007. ISSN 1678-5169.**

CASA, J.; CASTRO, E. Recycling of washed olive pomace ash for fired clay brick manufacturing. **Construction and Building Materials**.61:320–326, 2014.

CASSANO, A., MOLINARI, R., ROMANO, M., DRIOLI, E. Treatment of aqueous effluents of the leather industry by membrane processes: A review. **Journal of Membrane Science**. 181(15):111-126, 2001. DOI:10.1016/S0376-7388(00)00399-9.

CAVALIERI, F.; PADELLA, F. Development of composite materials by mechanochemical treatment of post-consumer plastic waste. **Waste Management**. 22:913-916, 2002. DOI 10.1016/S0956-053X(02)00084-3.

CES SELECTOR. **Granta Design Limited**, 2013. Disponível em: <https://www.grantadesign.com/products/ces/>

CHANDA, M.; ROY, S. K. **Plastics Technology Handbook**. Fourth edition, Boca Raton: CRC Press, 2007.

CHELSEA CENTER FOR RECYCLING AND ECONOMIC DEVELOPMENT. Technical Report #22 **Development of New Colors and Style for Recycled Polypropylene Toothbrushes**, 2000. <http://masslib-dspace.longsight.com/bitstream/handle/2452/113646/ocn777576988-22.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

CHENG, J., CAO, Y., JIANG, S., GAO, Y., NIE, J., SUN, F. Synthesis and Performances of UV-Curable Polysiloxane–Polyether Block Polyurethane Acrylates for PVC Leather Finishing Agents. **Industrial & Engineering Chemistry Research**. 54:5635-5642, 2015. DOI: 10.1021/acs.iecr.5b00009.

CHIU, C.; HSU, T.; YANG, W. Life cycle assessment on using recycled materials for rehabilitating asphalt pavements. **Resources, Conservation and Recycling**. 52(3):545–556., 2008. DOI: 10.1016/j.resconrec.2007.07.001.

CHOKLAT, Aki. **Design de Sapatos**. São Paulo: Editora Senac, 2012.

CIESIELSKI, A. **An introduction to rubber technology**. Shropshire: Rapra Technology, 1999.

COGSWELL, F. N. 2013. **Thermoplastic Aromatic Polymer Composites: A Study of the Structure, Processing and Properties of Carbon Fibre Reinforced Polyetheretherketone and Related Materials**. Oxford: Butterworth-Heinemann. First Published in 1992. ISBN 0 7506 1086 7. 288 p.

COLOM, X.; CARRILLO, F.; CAÑAVATE, J. Composites reinforced with reused tires: Surface oxidant treatment to improve the interfacial compatibility. **Composites: Part A**:

Applied Science and Manufacturing. 38(1):44-50., 2007. DOI 10.1016/j.compositesa.2006.01.022.

CONWAY, H. **Design History: a student's handbook**. Routledge: Oxon, 1999.

DAYANANDAN, A., KANAGARAJ, J., SOUDERRAJ, L., GGOVINDARAJU, R., RAJKUMAR, G S. Application of an alkaline protease in leather processing: an ecofriendly approach. Journal of Cleaner Production. **11(5):533-536, 2003. DOI:10.1016/S0959-6526(02)00056-2.**

DONDERO, M.; PASTOR, J.; CARELLA, J.; PEREZ, C. Adhesion Control for Injection Overmolding of Polypropylene With Elastomeric Ethylene Copolymers. Polymer, **Engineering and Science**. 49:1886-1893, 2009.

DROSTE, M. **Bauhaus: 1919 – 1933**. Berlin: Taschen, 2002.

EUROPEAN COMMISSION REGULATION (EU) N° 10/2011 of 14 January 2011. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:012:0001:0089:en:PDF>

EVORA, M. C., GONÇALVEZ, O. L., DUTRA, R. C. L., DINIZ, M. F., WIEBCK, H., SILVA, L. G. A. Comparação de Técnicas FTIR de Transmissão, Reflexão e Fotoacústica na Análise de Poliamida-6, Reciclada e Irradiada. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. 12(1):60-68, 2002.

FAVI, C.; GERMANI, M.; MANDOLINI, M.; MARCONI, M.. Lean DfD: A Design for Disassembly Approach to Evaluate the Feasibility of Different End-of-Life Scenários for Industrial Products. In: **Leveraging Technology for a Sustainable World**. DORNFELD, D.; LINKE, B. (editors). Springer: Berkeley, 2012.

FERNANDES, B.; GUSSO, A.; FORNARI Jr. C. C. M. Avaliação da secagem de fibras de coco a 100°C, visando sua micronização para utilização em compósitos poliméricos. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**. 10(2):141-148, 2008. ISSN 1517-8595.

FERRANTE, M. Seleção dos Materiais de Construção Mecânica: Estratégias e Metodologia Básica. **Simpósio Matéria 2000**. Rio de Janeiro, de 23 a 27 de outubro de 2000.

FERRANTE, M.; WALTER, Y. **A materialização da ideia: noções de materiais para design de produto**. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

FERREIRA, Maira; et al. **Química Orgânica**. Porto Alegre: Artmed, 2007.

FORNARI Jr., C. C. M.; SOUZA, B. F.; SOUZA, T. F.; PESSOA, T. B. A. Avaliação do balanço energético de micronização de fibras vegetais para aplicações tecnológicas em novos materiais. **Revista Ciências Exatas, Universidade de Taubaté**. 8(1), 2008. ISSN: 1516-2893.

FRIED. D. A. **Shoes that don't hurt**. Victoria, Canada: Trafford Publishing, 64p., 2006.

FU, S.; FENG, X.; LAUKE, B.; MAI, Y. Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate-polymer composites. **Composites: Part B: Engineering**. 39(6):933-961, 2008. DOI 10.1016/j.compositesb.2008.01.002.

GABRYS, J.; HAWKINS, G.; MICHAEL, M. **Accumulation: The Material Politics of Plastic**. Oxon: Routledge, 2013

- GAZIULUSOY, A. I.; BOYLE, C.; McDOWALL, R. Idil, et al. System innovation for sustainability: a systemic double-flow scenario method for companies. **Journal of Cleaner Production**. 45:104-116, 2013.
- GIUDICE, F.; ROSA, G.; RISITANO, A. **Product Design for the Environment: A Life Cycle Approach**. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- GEBLER, M., UITERKAMP, A. J. M. S., VISSER, C. A global sustainability perspective on 3D printing technologies. **Energy Policy**. 74:158-167, 2014. DOI: 10.1016/j.enpol.2014.08.033.
- GHELLER JUNIOR, J. **Influência da microestrutura, sistema de cura e aditivos sobre as propriedades dos TPV's a base de PP/EPDM**. Tese de Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais – UFRGS, 2011.
- GOMES, M.; MARTINO, D.; PONTES, A. J.; VIANA, J. C. Co-injection Molding of Immiscible Polymers: Skin-Core Structure and Adhesion Studies. **Polymer Engineering and Science**. 51(12):2398 – 2407, 2011.
- GOODSHIP, V. **Introduction to Plastics Recycling**, Second Edition. Shrewsbury: Smithers Rapra Publishing, 2007.
- GRANTA DESIGN. **How Tecumseh use systematic materials selection to reduce costs while enhancing quality and reliability**. 2016. Disponível em: <https://www.grantadesign.com/news/news/reports/tecumseh.shtml>
- GROVER, D., MALHOTRA, R., KAUSHAL, S., KAUR, G. Toothbrush 'A key to mechanical plaque control'. **Indian Journal of Oral Sciences**. 3(2):62-68, 2012. DOI 10.4103/0976-6944.106456.
- GUIA DE DESIGN DO CALÇADO BRASILEIRO. **Agregando Valor ao calçado**. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Indústria e Comércio exterior, 2003.
- GUNASEKARAN, S., NATARJAN, R. K., KALA, A. FTIR spectra and mechanical strength analysis of some selected rubber derivatives. **Spectrochimica Acta Part A**, 68(2):323-330, 2007. DOI 10.1016/j.saa.2006.11.039.
- HALLSTEDT, S. I.; THOMPSON, A. W.; LINDAHL, P. Key elements for implementing a strategic sustainability perspective in the product innovation process. **Journal of cleaner production**. 51:277-288, 2013.
- HARPER, C. A.; PETRIE, E. M. **Plastics Materials and processes, a concise encyclopedia**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003.
- HAUFFE, T. **Design, a concise history**. London: Laurence King Publishing, 1998.
- HESKETT, J. **Design: A very short introduction**. Oxford: Oxford University Press, 2005.
- HOHLBEIN, D. H. Colgate-Palmolive Company. Countouring toothbrush head. **US5758383 A**. 1998
- HONG, Y. J.; JEONG, K. M.; SAHA, P.; SUH, J.; KIM, J. K. Processing and characterization of microwave and ultrasonically treated waste - EPDM/LDPE polymer composites. **Polymer Engineering and Science**. 55(3):533-540, 2015. DOI 10.1002/pen.23916.

- HOPEWELL, J., DVORAK, R., KOSIOR, E. Plastics recycling challenges and opportunities. **Philosophical Transactions of the Royal Society**. 364(1526):2115-2126, 2009. DOI 10.1098/rstb.2008.0311.
- HUANG, Y., BIRD, R., HEIDRICH, O. A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. **Resources, Conservation and Recycling**. 52(1):58–73, 2007. DOI: 10.1016/j.resconrec.2007.02.002.
- HUANG, C.; ZHU, Q.; LI, C.; LIN, W.; XUE, D. Effects of micronized fibres on the cushion properties of foam buffer package materials. **BioResources**. 9(4):5940-5950, 2014.
- ICHINOSE, D.; YAMAMOTO, M. On the relationship between the provision of waste management and illegal dumping. **Resource and Energy Economics**. 33:79-93, 2011.
- ISAMAIL, Z. Z.; AL-HASHMI, E. A. Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. **Waste Management**. 28(11):2041-2047, 2008. DOI: 10.1016/j.wasman.2007.08.023.
- JABBOUR, A. B. S.; JABBOUR, C. J. C.; SARKIS, J.; GOVINDAN, K. Brazil's new national policy on solid waste: challenges and opportunities. **Clean Technology Environment Policy**. 16:7-9, 2014.
- JACOB, C.; DE, P. P.; BHOWMICK, A. K.; DE, S. K. Recycling of EPDM Waste. II. Replacement of Virgin Rubber by Ground EPDM Vulcanizate in EPDM/PP Thermoplastic Elastomeric Composition. **Journal of Applied Polymer Science**. 82:3304-3312. 2001. DOI: 10.1002/app.2189.
- JAHAN, A.; EDWARDS, K. **Multi-criteria decision analysis for supporting the selection of engineering materials in product design**. Butterworth-Heinemann: Oxford, 2013.
- JEONG, K. M.; HONG, Y. J.; SAHA, P.; PARK, S. H.; KIM, J. K. Novel polymer composites from waste ethylene-propylene-diene-monomer rubber by supercritical CO₂ foaming technology. **Waste Management & Research**. 1-10, 2014. DOI 10.1177/0734242X14545375.
- JIMÉNEZ, E.; CABAÑAS, B.; LEFEBVRE, G. **Environment, Energy and Climate Change I**. Springer: Switzerland, 2015.
- JOSHI, J. T. A Review on Micronization Techniques. **Journal of Pharmaceutical Science and Technology**. 3(7):651-681, 2011.
- JULIER, G. **The culture of design**. 3rd edition, SAGE publications Ltda, 2013.
- JUCÁ, J. F. T. **Disposição final dos resíduos sólidos urbanos no Brasil**. 5º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental. Porto Alegre, 2003.
- KAMINSKY, W. Chemical recycling of mixed plastics by pyrolysis. **Advances in Polymer Technology**. 14(3):337-344, 1995.
- KAMINSKY, W., KIM, J. Pyrolysis of mixed plastics into aromatics. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. 51(1-2):127-134, 1999. DOI 10.1016/S0165-2370(99)00012-1.
- KARANA, E.; PEDGLEY, O.; ROGNOLI, V. **Materials experience: Fundamentals of materials and design**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014.
- KARIAN, H. G. **Handbook of Polypropylene and Polypropylene Composites**. Second Edition, Revised and Expanded. New York: Marcel Dekker Inc., 2003.

- KATZ, A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. **Cement and Concrete Research**. 33(5):703– 711, 2003. DOI: 10.1016/S0008-8846(02)01033-5.
- KIM, N. H.; ISAYEV, A. I. Birefringence and Interface in Sequential Co-Injection Molding of Amorphous polymers: Simulation and Experiment. **Polymer Engineering and Science**. 55(1):88-106, 2015.
- KINDLEIN JÚNIOR, W.; NGASSA, A.; DESHAYES, P. Intelligence pour la planète et nouvelles intelligences méthodologiques. In YANNOU, B.; DESHAYES, P. **Eco-conception et développement**. France: L'Harmattan, 2006.
- KERR, W.; RYAN, C. Eco-efficiency gains from remanufacturing: A case study of photocopier remanufacturing at Fuji Xerox Australia. **Journal of Cleaner Production**. 9(1):75-8, 2001. DOI 10.1016/S0959-6526(00)00032-9.
- KOLLIKATHARA, N.; FENG, H.; YU, D. A system dynamic modeling approach for evaluating municipal solid waste generation, landfill capacity and related cost management issues. **Waste Management**. 30(11):2194-2203, 2010.
- KONAR, S.; GU, R.; SAIN, M. Preparation and characterization of baked nitrile latex foam reinforced with biomasses.** Industrial Crops and Products. **42:261–267. 2013. DOI: 10.1016/j.indcrop.2012.05.036.**
- KOUSHAL, V.; SHARMA R.; SHARMA, M.; SHARMA, R; SHARMA V. Plastics: Issues Challenges and Remediation. **Journal of Waste Resources**. 4(1):1-6, 2014. DOI 10.4172/2252-5211.1000134.
- KREIGER, M. A., MULDER, M. L., GLOVER, A. G., PEARCE, J. M. Life cycle analysis of distributed recycling of post-consumer high density polyethylene for 3-D printing filament. **Journal of Cleaner Production**. 70(1):90-96, 2014. DOI 10.1016/j.jclepro.2014.02.009.
- KROMM, F. X.; QUENISSET, J. M.; LORRIOT, T.; HARRY, R.; WARGNIER, R. Definition of a multi-materials design method. **Materials and Design**. 28(10):2641–2646, 2007. DOI 10.1016/j.matdes.2006.09.019.
- KUCZENSKI, B.; GEYER, R. Material flow analysis of polyethylene terephthalate in the US, 1996–2007. **Resources, Conservation and Recycling**. 54(12):1161–1169, 2010. DOI: 10.1016/j.resconrec.2010.03.013.
- LAGARINHOS, C.; TENÓRIO, J. Tecnologias Utilizadas para a Reutilização, Reciclagem e Valorização Energética de Pneus no Brasil. **Polímeros**. 18(2):106-118, 2008.
- LA MANTIA, F. P.; SCAFFARO, R. Recycling Polymer Blends. In Utracki, L. A.; Wilkie, C. A. (editores). **Polymer Blends Handbook**, Chapter 20, p. 1885, 2014. DOI 10.1007/978-94-007-6064-6_23.
- LEE, M. J.; RAHIMIFARD, S. An air-based automated material recycling system for postconsumer footwear products. **Resources, Conservation and Recycling**. 69:90-99, 2012. DOI: 10.1016/j.resconrec.2012.09.008.
- LEITE, P. R. **Logística Reversa: Meio ambiente e competitividade**. 2 ed. São Paulo: Prendice Hall, 2009.
- LESKO, J. **Industrial Design: materials and manufacturing**. New York: Wiley & Sons, 2008.

- LINDAHL, P.; ROBERT, K.; NY, H.; BROMAN, G. Strategig sustainability considerations in materials management. **Journal of Cleaner Production**. 64:98 - 103, 2014.
- LJUNGBERG, L. Y. Materials selection and design for development of sustainable products. **Materials and Design**. 28(2):466–479, 2007. DOI: 10.1016/j.matdes.2005.09.006.
- LÖBACH, B. **Design industrial: Bases para a configuração dos produtos industriais**. São Paulo: Edgar Blücher, 2001.
- LOFRANO, G., MERIC, S., ZENGIN, G., ORHON, D. Chemical and biological treatment technologies for leather tannery chemicals and wastewaters: A review. **Science of The Total Environment**. 461-462(1):265-281, 2013. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.05.004.
- LOKENS GARD, E. **Industrial Plastics: Theory and Applications**. 5th edition. New York: Delmar, 2010.
- LORENZO, V., DE LA ORDEN, M. U., MUÑOZ, C., SERRANO, C., URREAGA, J. M. Mechanical characterization of virgin and recovered polycarbonate based nanocomposites by means of depth sensing indentation measurements. **European Polymer Journal**. (55):1-8, 2014.
- MALEQUE, M. A.; SALIT, M. S. **Materials Selection and Design**. Singapore: Springer, 2013.
- MAJIDI, C. A Perspective—Current Trends and Prospects for the Future. **Soft Robotics**. 1(1):5-11, 2014. DOI: 10.1089/soro.2013.0001.
- MANNING, D. P.; JONES, C. The effect of roughness, floor polish, water, oil and ice on underfoot friction:: current safety footwear solings are less slip resistant than microcellular polyurethane. **Applied Ergonomics**. 32(2):185-196, 2001. DOI:10.1016/S0003-6870(00)00055-7.
- MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a Polímeros**. Segunda Edição. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.
- MANZINI, E.; VEZZOLI, C. **O Desenvolvimento de Produtos Sustentáveis - Os requisitos ambientais dos produtos industriais**. São Paulo: Edusp, 2002.
- MAO, A.; SH,ULSKY, R. Li, Q.; WAN, H. Recycling polyurethane materials: a comparison of polyol from glycolysis with micronized polyurethane powder in particleboard applications. **BioResources**. 9(3):4253-4263, 2014. ISSN: 1930-2126.
- MARCELLO, R. R.; GALATO, S.; PETERSON, M.; RIELLA, H. G.; BERNARDIN, A. M. Inorganic pigments made from the recycling of coal mine drainage treatment sludge. **Journal of Environmental Management**. 88(4):1280–1284, 2008. DOI 10.1016/j.jenvman.2007.07.005.
- MARGOLIN, V.; BUCHANAN, R. **Idea of Design**. Cambridge: MIT Press, 1995.
- MARKARIAN, J. Processing and recycling advantages drive growth in thermoplastic elastomers. **Plastics, Additives and Compounding**. 6(6):22-25, 2004. [http://dx.doi.org/10.1016/S1464-391X\(04\)00301-0](http://dx.doi.org/10.1016/S1464-391X(04)00301-0)
- MENARD, K. P. **Dynamic Mechanical Analysis: A Practical Introduction**. Second Edition. Boca Raton: CRC Press, 2008.
- MICHALSKI, M. H.; ROSS, J. S. **The Shape of Things to Come 3D Printing in Medicine**. JAMA. 312(21):2213-2214, 2014. DOI: 10.1001/jama.2014.9542.

- MITRA S., GHANBARI-SIAHKALI, A., KINGSHOTT, P., REHNMEIER, H. K., ABILDGAARD, H., ALMADAL, K. Chemical degradation of crosslinked ethylene-propylene-diene rubber in acidic environment. Part I: Effect on accelerated sulfur crosslinks. **Polymer Degradation and Stability**. 91(1):69-80, 2006. DOI 10.1016/j.polymdegradstab.2005.04.032
- MOELLER, H. W. (editor). **Progress in Polymer Degradation and Stability Research**. New York: Nova Science Publishers, 2008.
- MORSELLI, L.; PASSARINI, F.; VASSURA, I. **Waste recovery: Strategies, techniques and applications in Europe**. Milano: FrancoAngeli, 2009.
- MUNARI, B. **Das coisas nascem coisas**. 4ª Edição. São Paulo: Martins Fontes, 2008.
- MURAKAMI, F.; SULZBACH, A.; PEREIRA, G. M.; BORCHARDT, M.; SELBITTO, M. A. How the Brazilian government can use public policies to induce recycling and still save money? **Journal of Cleaner Production**. 96(1):94-101, 2014. DOI 10.1016/j.jclepro.2014.03.083.
- NAJAFI, S. K., HAMIDINIA, E., TAJVIDI, M. Mechanical properties of composites made from sawdust and recycled plastics. **Journal of applied Polymer Science**. 100:3641-3645, 2006. DOI 10.1002/app.23159.
- NICOLINI, A.; ROCHA, T. L. A. C.; JACOBI, M. A. M. Dynamically vulcanized PP/EPDM blends: Influence of curing agents on the morphology evolution. **Journal of Applied Polymer Science**. 109(5):3093-3100, 2008.
- NKWACHUKWU, O. I.; CHIMA, C. H.; IKENNA, A. O.; ALBERT, L. Focus on potential environmental issues on plastic world towards a sustainable plastic recycling in developing countries. **International Journal of Industrial Chemistry**. 4(34):1-13, 2013. DOI 10.1186/2228-5547-4-34.
- NOGUEIRA, L. M., DUTRA, R. C L., DINIZ, M. F., PIRES, M., EVANGELISTA, M., SANTANA, F. A., TOMASI, L., SANTOS, P., NONEMACHER, R. Avaliação da aplicabilidade de técnicas MIC/FT-IR/DSC para a caracterização de filmes multicamadas. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. 17(2):158-165, 2007. ISSN 1678-5169.
- OWINGS, T. M.; BOTEK, G. Design of Insoles, p. 291. In GOONETILLEKE, R. S. **The Science of Footwear**. New York: CRC Press, 726 p., 2012.
- PACHECO-TORGAL, F., JALALI, S., FUCIC, A. (editors). **Toxicity of building materials**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012. ISBN: 978-0-85709-635-7.
- PAINTER, P. C.; COLEMAN, M. M. **Essentials of Polymer science and engineering**. Pennsylvania: DEStech Publications, 2009.
- PALHANO, R., ZARO, M. A., AVILA, A. V., STROHAECKER, T. R. Analysis impact in shoes with different material soles. **Footwear Science**. 5(1):S34-S36, 2014. DOI: 10.1080/19424280.2013.799540.
- PALMER, J., GHITA, O. R., SAVAGE, L., EVANS, K. E. Successful closed-loop recycling of thermoset composites. **Composites: Part A**. 40:490-498, 2009. DOI 10.1016/j.compositesa.2009.02.002.
- PARK, S. H.; KIM, S. H. **Poly (ethylene terephthalate) recycling for high value added textiles**. **Fashion and Textiles**, 2014. DOI: 10.1186/s40691-014-0001-x.

- PEDROSO, A. G.; ROSA, D. S. Mechanical, thermal and morphological characterization of recycled LDPE/corn starch blends. **Carbohydrate Polymers**. 51(1):1-9, 2005. DOI 10.1016/j.carbpol.2004.08.018.
- PERRY, N., BERNARD, A., LAROCHE, F., POMPIDOU, S. Improving design for recycling - Application to composites. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**. 61:151-154, 2012. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.081>.
- PFAHL, R.; RACK, H. The impact of materials. In **Materials and society: from research to manufacturing – report from a workshop**. National Academy Press, 2003.
- PICKERING, S. J. Recycling technologies for thermoset composite materials - status. **Composites: Part A**. 37:1206-1215, 2006. DOI 10.1016/j.compositesa.2005.05.030.
- PILATO, L. (editor). **Phenolic Resins: A century of progress**. Springer: Berlin, 2010.
- PINTO, J. C.; et al. **Impactos ambientais causados pelos plásticos – Uma discussão abrangente sobre os mitos e dados científicos**, segunda edição. Rio de Janeiro: E-papers, 2012.
- PLATCHEK, E. R. **Design industrial: metodologia para o desenvolvimento de produtos sustentáveis**. São Paulo: Atlas, 2012.
- PLATCHECK, E. R., SCHAEFFER, L., KINDLEIN Jr., W., CANDIDO, L. H. A. Methodology of eco-design for the development of more sustainable electro-eletronequipments. **Journal of Cleaner Production**. 16(1):75-86, 2008. DOI 10.1016/j.jclepro.2006.10.006.
- PRAMEETTHAA, J.; BHARATKUMAR, B. H. Experimental Investigation on the Influence of Micronized Biomass Silica in the Recycled Aggregate Concrete. **International Journal of Civil & Structural Engineering – IJCSE**. 1(1), 2014.
- PRENDEVILLE, S., O'CONNOR, F., PALMER, L. Material Selection foEcco-innovation: SPICE model. **Journal of Cleaner Production**. 85:31-40, 2014. DOI 10.1016/j.jclepro.2014.05.023.
- RAJENDRAN, S., SCELSI, L., HODZIC, A., SOUTIS, C., AL-MAADEED, M. A. Environmental impact assessment of composites containing recycled plastics. **Resources, Conservation and Recycling**, 60:131-139, 2012. DOI 10.1016/j.resconrec.2011.11.006.
- RAO, A., JHA, K., MISRA, S. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. **Resources, Conservation and Recycling**. 50(1):71–81, 2007. DOI: 0.1016/j.resconrec.2006.05.010.
- REINSCHMIDT, C.; NIGG, B. M. Current issues in the design of running and court shoes. *Sportverletzung/Sportschaden* 14, 71–81, 2000.
- RAIZMAN, David. *History of modern design*. Laurence King Publishing: London, 2003.
- RESOLUÇÃO Nº5 DE 8 DE MARÇO DE 2004**. Disponível em: http://portal.mec.gov.br/cne/arquivos/pdf/rces05_04.pdf Acessado em 28/04/2015.
- ReVELLE, J. B. (editor). **Manufacturing Book of Best Pactices: An innovation, productivity and quality focus**. Boca Raton: CRC Press, 2002.
- REVERCHON, E., ADAMI, R., CAMPARDELLI, R., DELLA PORTA, G., DE MARCO, I., SCOGNAMIGLIO, M.. *Supercritical fluids based techniques to process pharmaceutical*

products difficult to micronize: Palmitoylethanolamide. **The Journal of Supercritical Fluids**. 102:24-31, 2015. DOI 10.1016/j.supflu.2015.04.005.

REZENDE, L. R.; CARVALHO, J. C. The use of quarry waste in pavement construction. **Resources, Conservation and Recycling**, 39(1):91-105, 2003. DOI:10.1016/S0921-3449(02)00123-4.

RIBEIRO, C., FERREIRA, J. F., PARTIDÁRIO, P. Life Cycle Assessment of a Multi-Material Car Component. **Internation Journal of Life Cicle Assessment**. 12(5):336-345, 2007. DOI <http://dx.doi.org/10.1065/lca2006.12.304>.

ROSEMA, N. A. M., SLOT, D. E., HELDERMAN, W. H. van P., WIGGELINKHUIZEN, L., VAN DER WEIJDEN, G. A. The efficacy of powered toothbrushes following a brushing exercise: a systematic review, 2015. **International Journal of Dental Hygiene**. DOI: 10.1111/idh.12115.

SANTOS, K. S.; et al. Optimization of the mechanical properties of polypropylene-based nanocomposite via the addition of a combination of organoclays. **Composites: Part A**, n. 40, p. 1199–1209, 2009.

SENAI – SP. **Modelista de cabedais de calçados**. São Paulo: Sesi/Senai Editora. 192 p., 2015.

SHUKLA, S. R., HARAD, A. M., JAWALE, L. S. Recycling of waste PET into useful textile auxiliaries. **Waste Management**. 28(1):51-56, 2008. DOI: 10.1016/j.wasman.2006.11.002.

SHUKLA, S. R., HARAD, A. M., JAWALE, L. S. Chemical recycling of PET waste into hydrophobic textile dyestuffs. **Polymer Degradation and Stability**. 94(4):604-609, 2009. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2009.01.007.

SHULMAN, V. **Tyre Recycling**. Shropshire: Rapra Technology.15(7) ISSN – 0889-3144, 2004.

SIDDIQUE, R., KHATIB, J., KAUR, I. Use of recycled plastic in concrete: A review. **Waste Management**. 28(10):1835-1852, 2008. DOI: 10.1016/j.wasman.2007.09.011.

SILVERSTEIN, R. M.; WEBSTER, F. X.; KIEMLE, D. J.; BRYCE, D. L. Spectrometric Identification of Organic Compounds. **8th Edition. John Wiley & Sons, 2007. ISBN 978-0-470-61637-6**.

SIMÕES, C. L.; PINTO, L. M. C.; BERNARDO, C. A. Environmental and economic assessment of Road safety product made with virgin and recycled HDPE: A comparative study. **Journal of Environmental Management**. 114: 209-215, 2013.

SJÖSTRÖM, M.; ÖSTBLÖM, G. Decoupling waste generation from economic growth – A CGE analysis of the Swedish case. **Ecological Economics**. 69:1545 – 1552, 2010.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais**. 5ª edição. Porto Alegre: AMGH, 2012.

SOMIYA S. (editor) 2013. **Handbook of Advanced Ceramics: Materials, Applications, Processing and Properties**. Second edition. Oxford: Academic Press.

SONNIER, R., LEROY, E., CLERC, L., BERGERET, A., LOPEZ-CUESTA, J.-M., BRETELLE, A.-S., IENNY, P. Compatibilizing thermoplastic/ground tire rubber powder blends: Efficiency and limits. **Polymer Testing**. 27:901-907, 2008. DOI 10.1016/j.polymertesting.2008.07.003.

SPARKE, P. **An introduction to design and culture, 1900 to the present**. 3^o edition. Oxon: Routledge, 2013.

SPERLING, L.H. **Introduction to Physical Polymer Science**. Fourth Edition. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.

STARK, J., LEE, J., NGUYEN, C., TEHRANI, A., YOUNG, S. Extending API-Grade barite. **American Association of Drilling Engineers, Fluids Technical Conference and Exhibition**. April, 15-16,2014. Houston-Texas.

THOMAS, S.; YANG, W. **Advances in Polymer Processing: From Macro To Nano Scales**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2009.

TRIPATHI, D. **Practical Guide to Polypropylene**. Shawbury, Shrewsbury, Shropshire: Rapra Technology LTD, 2002.

UNITED STATES PROTECTION AGENCY. National Emission Standards for Hazardous Air: Polyvinyl Chloride and Copolymers Production - **Withdrawal of Certain Emission Limits for Polyvinyl Chloride and Copolymers (PVC) Production Area Sources, 2015**. <http://www3.epa.gov/airtoxics/pvc/pvcpg.html>

VAN BEZOOYEN, A. **Materials Driven Design**. Chapter 19 in KARANA, Elvin; PEDGLEY, Owain; ROGNOLI, Valentina. *Materials experience: Fundamentals of materials and design*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014.

VAN DUIN, M. Recent Developments for EPDM-Based Thermoplastic Vulcanizates. **Macromolecular Symposia**. 233:11-26, 2006.

VAN KESTEREN, I. E. H.; et al. Materials in product selection: tools for including user-interaction in materials selection. **International Journal of Design**, V.1 n°3, 2007.

VANDANA, K. R., RAJU, Y. P., CHOWDARY, V. H., SUSHMA, M., KUMAR, N. V. An overview on *in situ* micronization technique – An emerging novel concept in advanced drug delivery. **Saudi Pharmaceutical Journal**. 22(4):283-289, 2014. DOI 10.1016/j.jsps.2013.05.004.

XU, X.; ZHIPINGB, W. Environmental Cost Analysis and Upgrading Research of Synthetic **Leather Industry**. **Energy Procedia**. 5:1341–1347, 2011. DOI: 10.1016/j.egypro.2011.03.232.

WARGNIER, W.; KROMM, F. X.; DANIS, M.; BRÈCHET, Y. Proposal for a multi-material design procedure. **Materials and Design**. 56:44-49, 2014. DOI 10.1016/j.matdes.2013.11.004.

WILKES, S.; WONGSRIRUKSA, S.; HOWES, P.; GAMESTER, R.; WITCHEL, H.; CONREEN, M.; LAUGHLIN, Z.; MIODOWNIK, M. Design tools for interdisciplinary translation of material experiences. **Materials & Design**, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.04.013>.

WORRELL, E.; REUTER, M. (editors) **Handbook of Recycling: State-of-the-art for practioners, analysts and scientist**. Elsevier: Oxford, 2014.

WRAP. **LCA of management options for mixed waste plastics**. 2008. ISBN 1-84405-397-0

YANG, Z.; LIAN, L.; CHEN, Y. Haptic function evaluation of multi-material part design. **Computer-Aided Design**. 37(7):727-736, 2005. DOI 10.1016/j.cad.2004.08.010.

YOUNG, R. J.; LOVELL, P. A. **Introduction to Polymers**. Third Edition, Florida: Taylor & Francis, 2011.

ZAVERL, M.; VALERIO, O.; MISRA, M.; MOHANTY, A. Study of the Effect of Processing Conditions on the Co-Injection of PBS/PBAT and PTT/PBT Blends for Parts with Increased Bio-Content. **Journal of Applied Polymer Science**. 132(2):1-11, 2013. DOI 10.1002/app.41278.

ZHANG, S. L., XIN, Z. X., ZHANG, Z. X., KIM, J. K.. Characterization of the properties of thermoplastic elastomers containing waste rubber tire powder. **Waste Management**. 29(5):1480 – 1485, 2009. DOI 10.1016/j.wasman.2008.10.004.

YIP, H. L. H., PICKERING, S. J., RUDD, C. D. Characterisation of carbon fibres recycled from scrap composites using fluidised bed process. **Plastics, Rubber and Composites**. 31(6):278-282, 2002. DOI 10.1179/146580102225003047.