



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Instituto Politécnico

Eleandro Baptista Pinho

**Análise técnica do uso de resíduos de poli(tereftalato de etileno)
(PET) na indústria têxtil**

Nova Friburgo

2011

Eleandro Baptista Pinho

**Análise técnica do uso de resíduos de poli(tereftalato de etileno) (PET) na
indústria têxtil**



Dissertação apresentada, como requisito para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Materiais Poliméricos.

Orientador: Prof. Dr. Helson Moreira da Costa

Nova Friburgo

2011

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ/REDE SIRIUS/BIBLIOTECA CTC/E

P654 Pinho, Eleandro Baptista.
Análise técnica do uso de resíduos de poli(tereftalato de etileno)
(PET) na indústria têxtil / Eleandro Baptista Pinho. - 2011.
83 f. : il.

Orientador: Helson Moreira da Costa.
Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de
Janeiro, Instituto Politécnico.

1. Materiais plásticos – Teses. 2. Fibras sintéticas -
Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.) – Teses. 3. Indústria têxtil –
Resíduos – Reciclagem - Teses. I. Costa, Helson Moreira da. II.
Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto Politécnico. III.
Título.

CDU 677.494:628.477.6

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial
desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Eleandro Baptista Pinho

**Análise técnica do uso de resíduos de poli(tereftalato de etileno) (PET) na
indústria têxtil**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Tecnologia de Materiais do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Materiais Poliméricos.

Aprovado em 14 de dezembro de 2011.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Helson Moreira da Costa (Orientador)
Instituto Politécnico - UERJ

Prof. Dr. Norberto Cella
Instituto Politécnico - UERJ

Prof. Dr. Alex da Silva Sirqueira
Universidade Estadual da Zona Oeste - UEZO

Nova Friburgo

2011

AGRADECIMENTOS

Na realização deste trabalho contei com várias formas de colaboração e apoio, todas com grande significado. Assim faço desta página um portal de reconhecimento e agradecimentos.

Gostaria de agradecer a meus pais, Dejaime de Alcantara Pinho e Denir Baptista Pinho, e a minha esposa Letícia Pinho, pelo apoio fundamental, sempre com dedicação, carinho e incentivo, além da colaboração constante e do suporte familiar.

Certamente a ajuda dos profissionais das empresas e do SENAI – CETIQT que muito me ajudaram, Richard, Vladimir, Ironildo, Luiz Gustavo, Alexandre Bolim e Ronaldo, por eles terem se debruçado nesse estudo, nas pesquisas, e me direcionado com a lucidez da prática e experiências que eles obtêm.

Ao meu orientador, Helson Moreira da Costa, agradeço pela orientação, dedicação, e por todo incentivo dado nos momentos apropriados, além da confiança que ele depositou em mim e no meu trabalho.

Agradeço também ao corpo docente do Curso de Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais do IPRJ/UERJ, por terem ampliado os caminhos de meu aprendizado e movido através das aulas meu conhecimento em ciência dos materiais.

Ao coordenador Norberto Cella, que sempre me apoiou, incentivou e dedicou confiança em mim e um agradecimento especial ao amigo, professor e coordenador Leonardo Mendes que sempre se colocou a disposição para todo o apoio necessário, que se empenhou de forma singular orientando em todas as referências com sua capacidade e experiência no ramo da Engenharia Têxtil.

Nessa fase final do mestrado recebi um presente de DEUS minha filha Valentina Pinho.

DEUS é a minha grande inspiração, luz, força e superação eu agradeço SUA bênção, que sustenta minha fé e move a humanidade para a evolução, redenção e amor.

Dêem graças a Deus, o Senhor, porque ele é bom, e porque o seu amor dura para sempre.

Salmos 107:1

RESUMO

PINHO, Eleandro Baptista. Análise técnica do uso de resíduos de poli(tereftalato de etileno) (PET) na indústria têxtil, 2011. 83 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2011.

O aumento no volume de rejeitos industriais e a contínua produção de resíduos de naturezas diversas causam muitas preocupações no âmbito ambiental. Neste contexto, o descarte de embalagens e garrafas de poli(tereftalato de etileno) (PET) tem se tornado um grande problema por conta da pequena atenção que se dá à sua destinação final. Assim sendo, essa pesquisa propõe a análise técnica da utilização de resíduos de PET, oriundos de reciclagem primária, como matéria-prima para a indústria têxtil. Fios de PET reciclado foram comparados aos fios comerciais de poliéster através de diversos ensaios como, por exemplo, resistência à tração e ensaios para solidificação da cor. Ao mesmo tempo, a microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi usada para a investigação da morfologia dos fios e melhor interpretação dos resultados. Pôde ser verificado que os fios de PET reciclado apresentam satisfatório desempenho, embora a resistência mecânica e a solidez a cor à luz sejam inferiores àquelas dos fios convencionais de poliéster.

Palavras-chaves: Poli(tereftalato de etileno). Ensaio físicos. Indústria têxtil. Poliéster.

ABSTRACT

The increase in the volume of industrial wastes and continuous production of solid waste of various kinds cause many environmental concerns. In this context, the disposal of packaging and bottles of poly(ethylene terephthalate) (PET) has become a major problem because of the little attention given to the final destination. Therefore, this research proposes a technical analysis of the use of PET waste, from primary recycling, as feedstock for textile industry. Yarns of recycled PET were compared with commercial polyester yarns through of various analysis, such as, tensile test and solidification color analysis. At the same time, scanning electron microscopy (SEM) was used to investigate the morphology of the yarns and better interpretation of results. It might be noted that yarns of PET recycled have satisfactory performance, although tensile strength and solidity color to light are inferior to conventional polyester yarns.

Keywords: Poly(ethylene terephthalate). Physical testing. Textile industry. Polyester.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Descarte de resíduos em quilos/dia nos principais estados brasileiros.	13
Figura 2 - Distribuição percentual da geração diária de resíduos no Brasil por regiões.....	13
Figura 3 - Obtenção do poli (tereftalato de etileno).....	19
Figura 4 - Variação do consumo de embalagens de PET e reciclagem pós-consumo ao longo dos anos (1994-2008).....	25
Figura 5 - Reação de degradação do PET com formação de ácido carboxílico e aldeído.....	27
Figura 6 - Curvas de refletância para algumas tonalidades de cor.....	41
Figura 7 - Garrafas PET e outros resíduos sólidos que inviabilizam a reciclagem do poli(tereftalato de etila.....	43
Figura 8 - Resíduos sólidos provenientes da indústria de confecção de poliésteres.....	43
Figura 9 - Fio têxtil produzido usando-se as garrafas PET e o resíduo da confecção de poliésteres.....	44
Figura10 - Tecido confeccionado com resíduos de garrafas PET e resíduos sólidos de produções fabris juntamente com elastano.....	46
Figura 11 - Gráfico das etapas de tingimento do tecido.....	49
Figura 12 - Diferentes estruturas químicas de corantes de baixa, média e alta energia.....	51
Figura 13 - Processo de tingimento dos fios de PET _c e PET _r	53
Figura 14 - Processo de tingimento para os fios de PES _c	62
Figura 15 - Processo de tingimento para os fios de PET _r	62
Figura 16 - Unidade de perspirômetro.....	66
Figura 17 - Aparelho crockmeter.....	68
Figura 18 - Peças confeccionados com o tecido oriundo de fios de PET reciclado (confecções de Nova Friburgo – Suspiro Íntimo).....	73
Figura 19 - Peças confeccionados com o tecido oriundo de fios de PET reciclado (confecções de Nova Friburgo – Suspiro Íntimo).....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades de filmes/chapas de APET e CPET.....	22
Tabela 2 - Comparação entre pigmentos orgânicos e inorgânicos.....	37
Tabela 3 - Distribuição do consumo dos pigmentos.....	38
Tabela 4 - Classificação dos corantes dispersos.....	50
Tabela 5 - Resistência à ruptura, deformação na ruptura e densidade linear dos fios de poliéster comercial e PET reciclado.....	59
Tabela 6 - Resultados do ensaio <i>Smart Liquor</i> para os fio de poliéster comercial (PETc) e PET reciclado (PETr).....	60
Tabela 7 - Resultados da caracterização de solidez à cor.....	64
Tabela 8 - Resultados da caracterização de solidez da cor à fricção.....	64

LISTA DE SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABQT	Associação Brasileira de Químicos Têxteis
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
BPF	Boas Práticas de Fabricação
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
DPO	Dispersed Oil Particulate
GMPs	Good Manufacturing Practices
HEPA	High Efficiency Particulate Air
HVCA	Heating and Ventilating Contractors Association
IB	Instituto de Biologia
IEL	Instituto Evando Lodi
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia
ISO	International Standards Organization
OCDE	Organization for Economic Co-operation and Development
OMS	Organização Mundial de Saúde
TBS	Temperaturas dos Bulbos Secos
TRA	Thomas Research Associates
ULPA	Ultra Low Penetration Air
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
UR	Umidade Relativa
UTA	Unidades de tratamento de ar

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	11
1	OBJETIVOS	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Poli (tereftalato de etileno)	16
2.2	Processo de Obtenção	18
2.3	Estrutura Molecular e principais características	20
2.4	Reciclagem do Poli (tereftalato de etileno)	22
2.5	Revisão bibliográfica – trabalhos acadêmicos sobre reciclagem de PET	28
2.6	Fibras Têxteis Químicas	32
2.7	Poliéster e suas funções oferecidas para a indústria têxtil	34
2.8	Corantes e Pigmentos utilizados na industria têxtil	35
2.8.1	Corantes para PES e PET	39
3	MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1	Tingimento do tecido de PET reciclado	46
3.2	Classificação dos corantes dispersos	49
3.3	Tingimentos dos fios de PET reciclado para estudo no SMART LIQUOR	51
3.4	Ensaio físico e químicos nos tecidos	55
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
4.1	Análise do desempenho mecânico dos fios de poliéster comercial e PET reciclado	58
4.2	Análise do processo de tingimento dos fios de PET_c e PET_r	60
4.3	Análise da Solidez do tingimento do fio reciclado	63
5	CONCLUSÕES	71
6	SUGESTÕES	75
	REFERÊNCIAS	76
	ANEXOS - Resultado dos testes feitos pelo Laboratório RIL/CETIQT	80

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de materiais mais fortes, mais leves e mais duráveis exerce um enorme impacto sobre o meio ambiente. Novos materiais tornaram mais leves diversos bens de consumo e artefatos industriais, reduzindo assim os custos de energia para o transporte e, frequentemente, também para a manufatura. Essas tendências são reforçadas, por exemplo, pela miniaturização e pela maior durabilidade de muitos produtos. Tais tendências são às vezes denominadas de “desmaterialização” das sociedades industriais, à medida que materiais modernos e melhor informação permitem que se faça mais com menos [1, 2].

Neste cenário, as discussões ambientais contemporâneas geralmente giram em torno da *sustentabilidade*; um assunto instigante e muito debatido. Ela advém da percepção de que a atividade humana está consumindo os recursos naturais a uma velocidade que ultrapassa a capacidade de recuperação da natureza. A sustentabilidade implica a manutenção desses recursos para futuras gerações [1, 2].

Esse conceito possui muitas aplicações. A *exploração sustentável da madeira*, por exemplo, refere-se à extração da madeira de modo a permitir a regeneração das florestas. A *agricultura sustentável* deve alimentar as pessoas sem exaurir a capacidade nutritiva do solo ou a biodiversidade dos *habitats* naturais. Um número crescente de empresas abraça a causa da sustentabilidade, protegendo o meio ambiente de uma forma que vai além das exigências legais. São exemplos disso: o controle voluntário de emissões; a opção por materiais ambientalmente *amigáveis* (um dos conceitos da *química verde*¹); e, a não-utilização de madeira tropical na fabricação de móveis. Assim, o novo campo da ecologia industrial contribui para a sustentabilidade ao encontrar meios de minimizar o consumo de materiais na sociedade industrial [1-3].

¹ Química verde é uma ciência relacionada ao meio ambiente. Foi introduzida nos Estados Unidos, pelo cientista Mark Harrison, da Universidade de Lehigh. Essa ciência basicamente tem o conceito de que os elementos químicos não podem degradar a natureza [1-3].

Na perspectiva do desenvolvimento de produtos sustentáveis, é preciso analisar que o Brasil mudou o seu tipo de lixo² em relação aquele que as cidades brasileiras produziam, por exemplo, quatro décadas atrás. O êxodo rural, do crescimento acelerado das cidades e as mudanças de hábitos de consumo fazem com que o resíduo sólido atual seja diferente não apenas em quantidade e qualidade, mas também em volume e composição [1-3].

Cada brasileiro hoje gera, em média, 1 kg de lixo por dia; tal fato representa, em termos aproximados, 190.000 toneladas por dia de lixo gerado em todo o país. Nas Figuras 1 e 2 estão representadas as quantidades geradas de resíduos nos principais estados brasileiros e o percentual diário gerado em cada região, respectivamente [3, 4].

Aliado a este problema, vem a baixa eficiência da grande maioria das prefeituras brasileiras, que operam com verdadeiros e vergonhosos lixões a céu aberto, faltando recursos e tecnologias para investimentos em aterros sanitários licenciados e oficiais, e o que seria melhor, incrementar a coleta seletiva para propiciar a reciclagem³. As grandes cidades, maiores produtoras de resíduos, não têm mais espaço para abrir aterros, e os antigos estão perto do limite. Segundo dados do IBGE, 80% da disposição final do lixo brasileiro é feita em vazadouros a céu aberto, sendo o pior cenário os das regiões Norte e Nordeste. Já a região brasileira que mais tem fomentado a reciclagem é a Sudeste, mesmo assim com 1,1% de todo o lixo produzido no país [3, 4].

² Todo material, quando não tem mais valor de uso ou não existe mais utilidade em conservá-lo, é denominado lixo [2].

³ É o resultado de uma série de atividades através das quais materiais que se tornariam lixo, ou estão no lixo, são desviados, sendo coletados, separados e processados para serem utilizados como matérias-primas na manufatura de outros bens, feitos anteriormente com matéria-prima virgem [2].

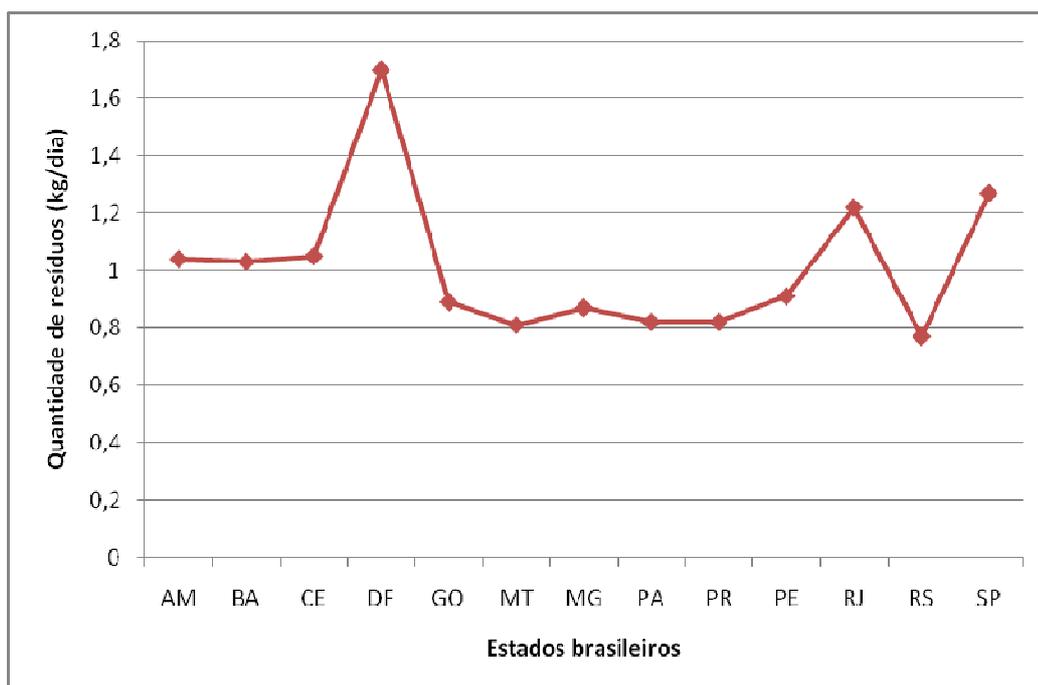


Figura 1 - Descarte de resíduos em quilos/dia nos principais estados brasileiros. [3]
Fonte: ABIPET, 2008.

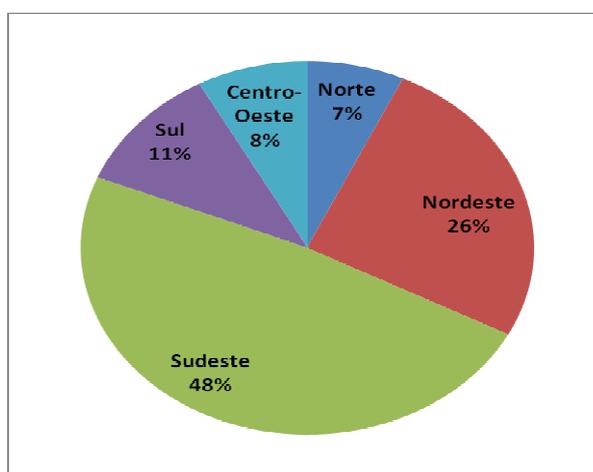


Figura 2 - Distribuição percentual da geração diária de resíduos no Brasil por regiões. [3]
Fonte: ABIPET 2009

Como uma grande alternativa para a substituição de outros materiais, apesar de sua recente história, a indústria do plástico é um dos setores da economia que mais se desenvolveu nos últimos anos em todo o mundo. O plástico é utilizado em quase todos os setores da economia, como: construção civil, lazer,

telecomunicações, indústrias eletroeletrônica, automobilística e médico-hospitalar e no transporte de energia. Atualmente, o setor de embalagens é o que mais se destaca na utilização do plástico. Aproximadamente 30% das resinas plásticas consumidas no Brasil destinam-se à indústria de embalagens. Não obstante os benefícios do plástico, a maior crítica em sua utilização é em relação a sua baixíssima biodegradabilidade ambiental [3, 4].

A reciclagem mecânica, ou seja, a conversão dos resíduos plásticos industriais e pós-consumo em grânulos, que podem ser reutilizados na produção de sacos de lixo, solados, pisos, mangueiras, componentes de automóveis, fibras, utensílios domésticos, etc., é uma alternativa para a reciclagem das embalagens de poli(tereftalato de etileno) ou PET. O PET é um poliéster termoplástico que tem como características a leveza, a resistência, a transparência e a baixa permeabilidade aos gases, o que o torna ideal para satisfazer a demanda de consumo doméstico por embalagens de refrigerantes. [4, 5].

A evolução do mercado e os avanços tecnológicos têm impulsionado novas aplicações para o PET reciclado - cordas e fios de costura; carpetes; bandejas de ovos e frutas; e até mesmo novas garrafas para produtos não alimentícios, uma vez que a aplicação original ainda não é permitida pela ANVISA (Agência Nacional de Vigilância Sanitária). A reciclagem, além de desviar lixo plástico dos aterros, utiliza apenas 0,3% da energia total necessária para a produção da resina virgem [1, 2, 5].

Atualmente, a fibra têxtil feita de garrafa PET reciclada possui a mesma denominação que poliéster reciclado. Na produção (transformação) do poliéster reciclado utiliza-se 30% da energia utilizada na produção da fibra virgem, ou seja, além da própria reciclagem que contribui para reduzir a quantidade de resíduos de lixo no meio ambiente, a economia no uso de energia também é um ativo ambiental desse produto. Em média, para se confeccionar uma camiseta, utiliza-se uma quantidade de fibra reciclada que corresponde a duas garrafas PET [1-5].

1 OBJETIVOS

O principal objetivo desta dissertação de Mestrado é investigar, através de ensaios físico-químicos específicos, a viabilidade técnica de se gerar tecidos com uma fibra têxtil obtida a partir de resíduos sólidos de PET. Tais resíduos são provenientes não apenas de embalagens e garrafas de bebidas carbonatadas pós-consumo, mas também da reciclagem primária da própria indústria têxtil.

É desejável que a fibra de PET reciclado possa substituir com igual desempenho a fibra de poliéster convencional usada na indústria têxtil. Assim sendo, a fiabilidade, o tecimento, o tingimento e os ensaios comumente utilizados para o poliéster convencional também foram considerados na análise do PET reciclado.

Espera-se que o produto obtido represente tanto a minimização do passivo ambiental, criado pelo descarte de embalagens e garrafas, como também propicie uma economia nas indústrias que possuem no poliéster sua principal fibra de mercado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Poli(tereftalato de etileno)

Os poliésteres são termoplásticos produzidos pela policondensação de um ácido dicarboxílico e um glicol ou um bifenol (álcool dihidroxilado) com eliminação de água. São polímeros de cadeia heterogênea, aromática e que tem um grupamento éster constituinte (R-CO-O-R'). A sequência alifática, aberta, não cíclica e o oxigênio na cadeia principal são responsáveis pela flexibilidade à temperatura ambiente. Porém, o grupo benzênico fornece a rigidez observada nestes polímeros, além de razoável interação eletrônica entre os anéis benzênicos vizinhos [6, 7].

Entre os poliésteres, o poli(tereftalato de etileno) ou PET é um plástico de engenharia de uso geral que apresenta excelente combinação de rigidez e tenacidade, alta resistência ao calor, estabilidade química e dimensional e capacidade de isolamento elétrico, além da possibilidade de se apresentar no estado amorfo (transparente), parcialmente cristalino e orientado (translúcido) e altamente cristalino (opaco), o que permite uma vasta aplicação [6, 7].

É extensivamente usado na produção de fibras têxteis; na indústria automobilística; filmes e placas para radiografia; fotografia e reprografia; como reforço (fibras) em materiais de construção civil; na produção de peças injetadas de grande porte; e, mais recentemente, na produção de filmes e embalagens para alimentos e cosméticos finos. Como embalagem para alimentos o PET reúne duas importantíssimas características: baixa permeabilidade aos gases CO₂ e O₂ e elevada relação leveza/resistência, fatores decisivos para a sua aplicação neste setor [6, 7].

A descoberta do PET aconteceu em 1928 nos laboratórios da DuPont, pela equipe liderada pelo Dr. W. H. Carothers, que estudava as reações de condensação entre glicóis e ácidos dibásicos. Ele já havia desenvolvido o náilon 6,6, uma

poliamida, e procurava novos polímeros para a produção de fibras, a serem usadas em substituição a seda [6, 7].

No início, foi obtido um grande número de poliésteres com baixa massa molecular, na faixa de 2.500 a 5.000 g/mol, sem nenhuma propriedade comercial importante. Com a continuação das pesquisas, ele conseguiu eliminar a água produzida na reação de condensação, o que permitiu a obtenção de polímeros com massa molecular de até 25.000 g/mol. Estes novos poliésteres eram sólidos, opacos, tenazes e fundiam a temperaturas elevadas em líquidos viscosos e translúcidos. Filamentos podiam ser obtidos facilmente a partir do material fundido, bastando tocá-lo com um bastão e afastá-lo. Quando solidificados, estes filamentos podiam ser estirados até muitas vezes o seu comprimento inicial e se tornavam transparentes, brilhantes e apresentavam alta elasticidade e resistência à tração. Exames feitos com raios X mostraram que estas fibras possuíam alto grau de orientação e cristalinidade [6, 7].

Na década de 1950 este poliéster foi usado principalmente na indústria têxtil, pela DuPont e pela ICI. Nos anos subsequentes houve um grande desenvolvimento tecnológico na sua produção, mantida ainda a sua principal aplicação como fibra e filmes variados. Como material de embalagem, o PET biorientado tornou-se disponível nos anos de 1960 com grande aplicação para acondicionamento de alimentos. Na mesma década, a Goodyear passou a utilizar este termoplástico na confecção de pneus [6, 7].

Em 1973 o processo de injeção e sopro com biorientação, desenvolvido pela DuPont, permitiu a introdução do PET na aplicação como garrafa, o que revolucionou o mercado de embalagem, principalmente o de bebidas carbonatadas. O PET grau garrafa apenas se tornou disponível no Brasil em 1989. Ele é um dos plásticos para embalagens mais versáteis que existe, assumindo a forma de filmes, lâminas, revestimentos e garrafas das mais diferentes formas e usos, de maior sucesso nas últimas décadas e com uma das maiores taxas de crescimento até então observadas [6, 7].

2.2 Processo de obtenção

O PET é um poliéster saturado formado pela reação do ácido tereftálico (TPA) ou dimetiltereftalato (DMT) e do etilenoglicol (EG), como mostra a Figura 3 [6, 7].

Catalisadores comuns na polimerização do PET são metais, óxidos ou sais metálicos. É importante ressaltar que ao final da etapa de policondensação, o PET apresenta massa molar da ordem de 20.000 a 29.000 g/mol e viscosidade intrínseca em torno de 0,65 dL/g. Este polímero é adequado a aplicações como fibra têxtil, filmes orientados reforçados com fibra de vidro e fitas magnéticas [6, 7].

A faixa de massa molar age como um fator limitante nas aplicações dos materiais poliméricos, pois influencia tanto na processabilidade como nas propriedades do produto final. A aplicação do PET para embalagens sopradas requer um polímero com massa molar acima de 40.000 g/mol e viscosidade intrínseca superior a 0,70 dl/g, o que não é possível de se obter apenas com o processo de policondensação [6, 7].

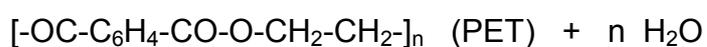
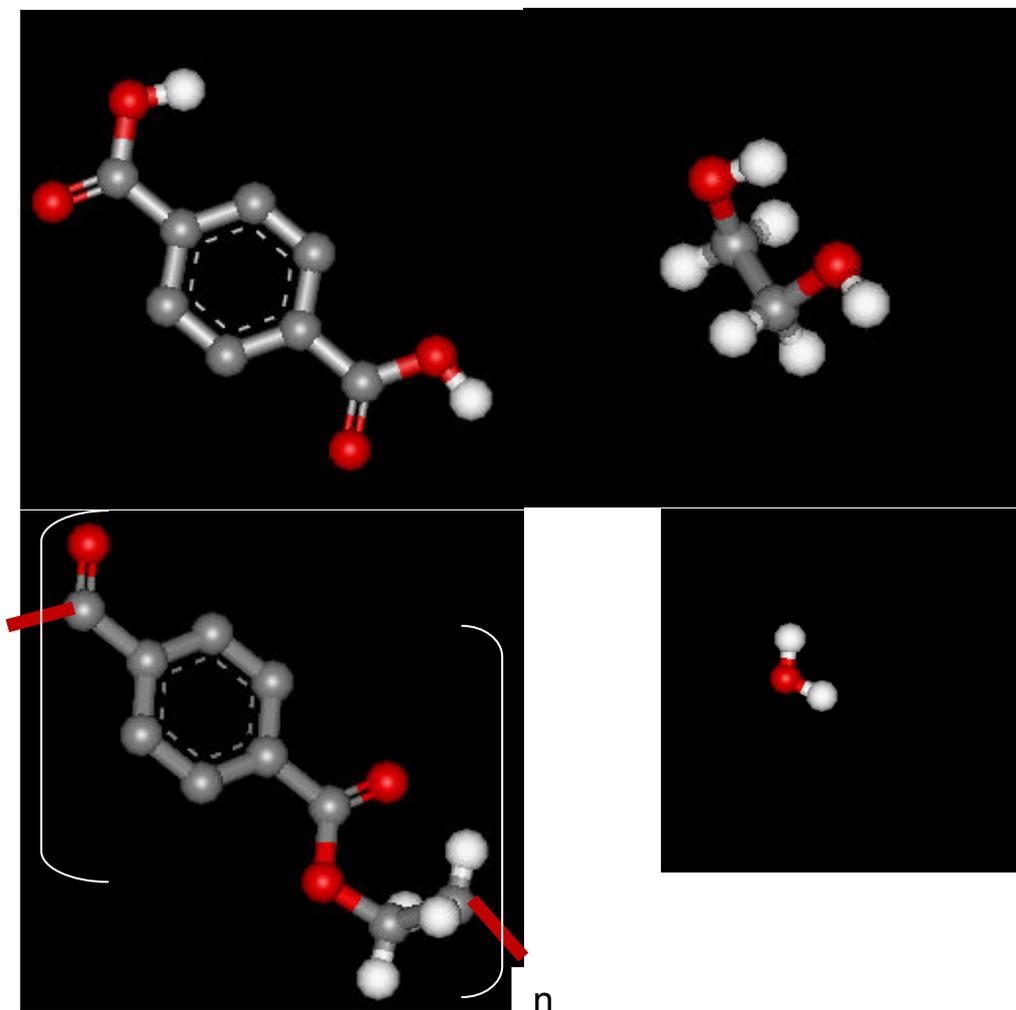


Figura 3 - Obtenção do poli(tereftalato de etileno) [6, 7]
Fonte: O Autor, 2011.

Para adequar o PET a essas aplicações, uma etapa adicional à polimerização foi introduzida, conhecida como “polimerização em estado sólido” ou “pós-condensação”, onde a massa molar requerida é alcançada. Os grãos de PET são inicialmente submetidos a um aquecimento a 160-170°C para promover a cristalização parcial e a secagem. Em seguida, eles são submetidos a um

aquecimento em 215°C por 16 h, em um reator cilíndrico com atmosfera de nitrogênio, ou a vácuo, aumentando a massa molar do polímero e a viscosidade intrínseca até atingir o valor necessário ao uso pretendido. Nesta segunda fase de polimerização, a resina PET, amorfa, obtida na primeira fase de fabricação é cristalizada e polimerizada continuamente. A resina é, então, embalada e está pronta para ser usada [6, 7].

2.3 Estrutura molecular e principais características

As moléculas de PET tendem a girar em torno das ligações C-O para permitir maior aproximação entre elas. Como resultado tornam-se mais “curtas”, distorcendo-se da conformação zig-zag planar de uma cadeia totalmente estendida encontrada em grande parte dos polímeros. Somente o grupamento $-\text{CO}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CO}-$ mantém esta conformação, necessária à sua ressonância. A flexibilidade das cadeias moleculares provém da rotação em torno das ligações saturadas [6, 7].

Como plástico de engenharia, o PET é normalmente injetado. Suas propriedades variam devido à massa molar, à cristalinidade, ao uso de subprodutos, ao uso de aditivos e do porcentual de comonômeros adicionados à resina [6, 7].

Os polímeros utilizados para moldagem por injeção ou extrusão podem apresentar estrutura amorfa ou cristalina. O polímero que produz peças com estrutura amorfa é em geral muito puro e possui alta massa molar, boa resistência ao impacto, boa transparência, baixa tendência a se cristalizar, mas não deve ser exposto a temperaturas superiores a 50°C [6, 7].

Impurezas podem acelerar o processo de cristalização das resinas sendo muitas vezes adicionadas intencionalmente quando são então denominadas agentes nucleantes. Um dos primeiros agentes nucleantes utilizado em poliésteres e poliamidas foi o talco (silicato de magnésio natural). Quando utilizado em proporções reduzidas o talco afeta muito pouco as características do produto [6, 7].

Atualmente são utilizados polietilenos de baixa densidade linear (LLDPE), em proporção de 3% em peso aproximadamente, por não serem miscíveis como as

resinas PET agem como iniciadores de cristalização (agente nucleante). Outros produtos foram desenvolvidos para serem usados como agentes de nucleação, mas sua composição é mantida em segredo industrial pelas indústrias [6, 7].

É importante observar que o fato de o polietileno servir como agente de nucleação impede-o que seja utilizado como base para corantes (masterbatch) quando se pretende fabricar produtos em PET amorfo, para embalagens, por exemplo [6,7].

A Tabela 1 apresenta alguns valores característicos para propriedades de diferentes graus de PET nas formas amorfa (APET) e cristalina (CPET). De uma maneira geral, as características e morfologia do PET podem ser resumidas em [6, 7]:

- ▶ **PET amorfo:** menor resistência; menor rigidez (menor módulo de elasticidade); e, menor resistência térmica quando comparado ao PET cristalizado termicamente (não orientado) e o PET biorientado. Difícil processamento (maior alongamento à ruptura) e alta permeabilidade aos gases;
- ▶ **PET cristalizado termicamente (não orientado):** alta resistência mecânica e térmica; alta rigidez comparado ao PET amorfo, porém menor que a do PET biorientado; frágil (baixo alongamento à ruptura); pequena permeabilidade aos gases;
- ▶ **PET biorientado (garrafa):** alta resistência mecânica e maior rigidez quando comparado ao PET cristalizado termicamente (não orientado); tenaz (alta resistência ao impacto); baixa permeabilidade aos gases (maior propriedade de barreira que o PET cristalizado termicamente, não orientado).

Tabela 1 - Propriedades de filmes/chapas de APET e CPET [6, 7]

Grau de PET	PET ^a		Copolímeros		
	homopolímero		COPET	PCT ^b	PETG ^c
<i>Viscosidade intrínseca (IV)</i>	0,68 a 0,85	0,90 a 1,05	0,68 a 0,80	1,00	0,75
<i>Temperatura de amolecimento (°C)</i>	252-259	255	220-232 ou 234	285	193
Densidade (g/cm³)					
<i>Amorfo</i>	1,33	1,33	1,33	1,195	1,27
<i>Cristalino (50%)</i>	1,39	1,39	1,4	1,265	-
<i>Densidade aparente do granulado (kg/m³)</i>	780 a 850	780 a 850	780 a 850	720 a 750	700 a 750
<i>PET tipo de filme/chapa</i>	APET	CPET	APET	CPET	APET
<i>Faixa de espessura (μm)</i>	50- 1.200	500- 1.500	50-1.200	500- 1.500	25- 1.200

^aPET – poli(tereftalato de etileno); ^bPCT – policiclohexileno-dimetilenotereftalato;

^cPETG - etileno-1,4-ciclohexileno-dimetilenotereftalato

2.4 Reciclagem do poli (tereftalato de etileno)

O controle do meio ambiente transparece nos posicionamentos em todas as frentes do setor plástico. Na petroquímica, falam por si as políticas de atuação responsável (*responsible care*), difundidas por subsidiárias dos grupos que as articulam internacionalmente, ou os investimentos na preservação das reservas ecológicas vizinhas, observados nos pólos do Sul e do Nordeste. Por sua vez, a indústria brasileira de máquinas para plástico volta-se hoje para a concepção de linhas qualificadas para reduzir ao máximo os índices de refugo e, nos compartimentos de impressão e pintura, usuárias de solventes a base de água.

Quanto aos transformadores, tornaram-se receptivos aos recursos de automação do processo movidos pela produtividade, cuja moderna conceituação também abrange o respeito ao meio ambiente [8].

A Agência de Proteção Ambiental Norte-Americana (EPA) define reciclagem como “a coleta, processamento, comercialização e o uso dos materiais considerados lixo”. Já a definição encontrada em dicionário, traz a reciclagem como “o processo pela qual passa um mesmo material já utilizado para fazer o mesmo produto ou um produto equivalente”. Assim, segundo estas definições, a reciclagem consiste num processo de transformação de materiais, previamente separados, de forma a possibilitar a sua recuperação. Estes materiais podem ter duas origens: rejeitos de processo industrial ou produto pós-consumo [8, 9].

Existem algumas famílias de plásticos muito comuns no mercado brasileiro, as quais não são compatíveis quimicamente entre si, ou seja, a mistura de alguns tipos pode resultar em materiais defeituosos, de baixa qualidade, sem as especificações técnicas necessárias para retornar à produção como matéria-prima. Tais famílias são [8]: *Poli(tereftalato de etileno) (PET)*: usado em garrafas de refrigerantes; *Polietilenos*: polietileno de alta densidade (HDPE) - consumido por fabricantes de engarrafados de bebidas, baldes, tambores, autopeças e outros produtos; polietileno de baixa densidade (LDPE) – filmes extrudados de alta transparência para embalagens em geral, como saquinhos de leite, sacos e sacolinhas em geral, frascos, recipientes para embalagens de produtos alimentícios, farmacêuticos e químicos, utensílios domésticos, entre outras; *Poli(cloreto de vinila) (PVC)*: comum em tubos e conexões e garrafas para água mineral e detergentes líquidos; *Polipropileno (PP)*: compõe embalagens de massas e biscoitos, potes de margarina, seringas descartáveis e utilidades domésticas, entre outros; *Poliestireno (PS)*: utilizado na fabricação de eletrodomésticos e copos descartáveis; utensílios domésticos rígidos, transparentes ou não, de uso generalizado; bandejas; objetos de papelaria (régua, esquadro e transferidores); entre outras.

A reciclagem de PET é, no Brasil, uma atividade recente do ponto de vista industrial. Desde 1994, a Associação Brasileira da Indústria do PET (ABIPET) procura mensurar tal mercado, bem como informar ao público sua atividade e desempenho. Também é tarefa da ABIPET estimular a reciclagem e o descarte

adequado das embalagens pós-consumo, bem como oferecer as informações necessárias para que a indústria de embalagens possa produzir com a questão ambiental em foco, direcionada pela reciclabilidade das garrafas, frascos e outras embalagens de PET [9-11].

Atualmente, a indústria recicladora está estabelecida por todo território nacional, o que demandou uma nova atividade de pesquisa: *O Censo da Reciclagem de PET* no Brasil. Um estudo completo sobre este importante segmento industrial, gerador de empregos e que destina adequadamente uma grande quantidade de embalagens de PET pós-consumo. Através do censo, é possível ter um panorama bastante completo sobre o universo de empresas dedicadas à reciclagem do PET, número de empregos gerados, demandas para o produto reciclado e concentrações geográficas [9-11].

A Figura 4 apresenta um gráfico de consumo de PET para embalagens e a quantidade proporcionalmente reciclada no Brasil para o período de 1994-2008 [9, 10].

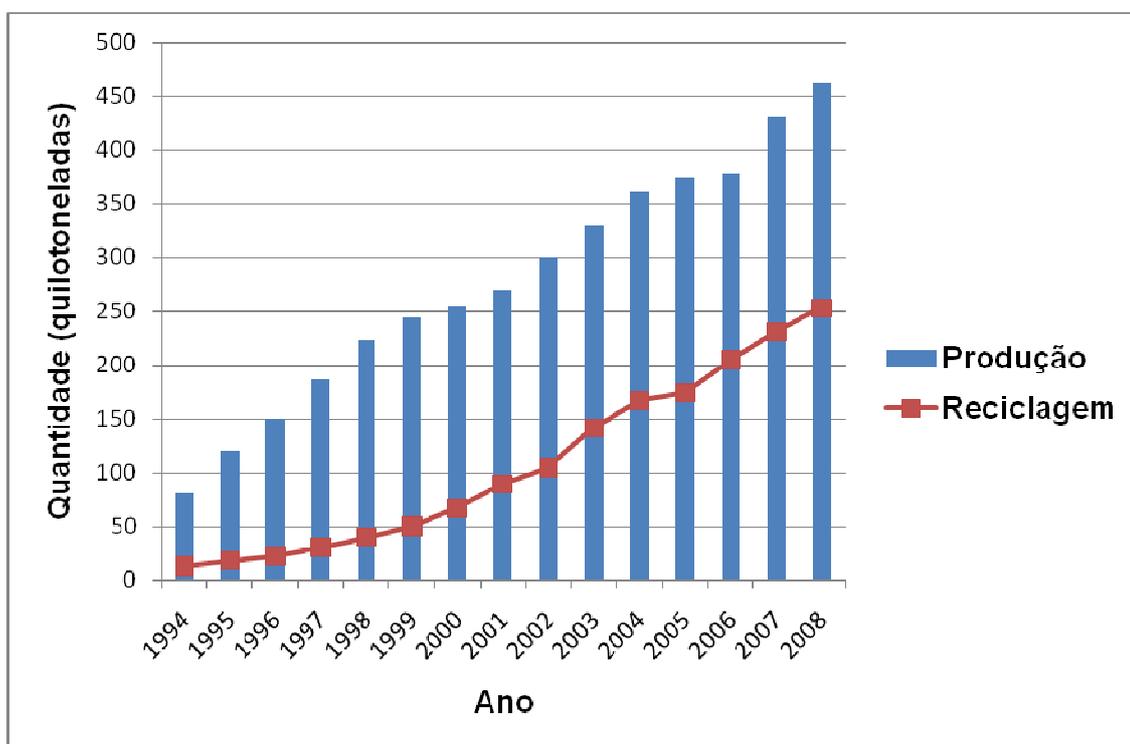


Figura 4 - Variação do consumo de embalagens de PET e reciclagem pós-consumo ao longo dos anos (1994-2008) [9,10]

Fonte: ABIPET, 2009.

Através da Figura 4 é possível observar que embora a quantidade reciclada tenha apresentado um aumento importante, o salto de produção foi ainda maior. Tal condição aumenta muito a quantidade não reciclada, o que causa problemas ambientais.

Os plásticos de maneira geral, inclusive o PET, podem ser reciclados de três maneiras diferentes [2, 3, 10]:

- ▶ **Reciclagem química:** também denominada terciária, consiste em um processo tecnológico onde se realiza a conversão do resíduo plástico em matérias-primas petroquímicas básicas (retorno a origem). É um processo de pouco uso no Brasil.

- ▶ **Reciclagem energética:** também conhecida como reciclagem quaternária, consiste em um processo tecnológico de recuperação da energia contida nos resíduos plásticos, através de incineradores com queima dos resíduos a altíssima temperatura. O PET tem alto poder calorífico e outros materiais combustíveis também podem ser utilizados. Este processo, entretanto, não é usado para o PET, pois o alto valor da sucata indica a reciclagem mecânica como a mais favorável.
- ▶ **Reciclagem mecânica:** consiste na combinação de um ou mais processos operacionais para o reaproveitamento do material descartado, transformando-o em grânulos para a fabricação de outros produtos. Se esses produtos possuem desempenho e características equivalentes à resina virgem do produto original (têm sua origem na própria indústria), a reciclagem é classificada como primária. Quando o produto final possui características, desempenho e propriedades mecânicas inferiores às comparadas com a resina virgem, a reciclagem é definida como secundária, e se aplica normalmente ao resíduo pós-consumo. Atualmente, o índice de reciclagem mecânica de polímeros no Brasil é de 20%, inferior a apenas cinco países europeus (Alemanha, 32%; Bélgica, 25%; Suíça, 23%; Suécia, 22%; e, Áustria, 21%).

Praticamente todo o PET reciclado no Brasil passa pelo processo mecânico. Geralmente são utilizados equipamentos de alta tecnologia, pois essa resina exige um processamento muito cuidadoso. O PET é higroscópico (absorve água), exigindo secagem rigorosa. Toda a contaminação com outras resinas deve ser eliminada. Dentre estas contaminações, a de maior dificuldade é a separação do PVC, que possui densidade semelhante ao PET; a técnica de flotação⁴ pode ser útil para esta separação [9-11].

A maior preocupação durante o reprocessamento do PET é a remoção de todos os contaminantes que possam catalisar a sua hidrólise. Os catalisadores de hidrólise podem ser ácidos ou básicos e são compostos químicos que promovem a

⁴ É um método de separação de misturas. Trata-se de uma técnica de separação muito usada na indústria de minerais, na remoção de tinta de papel e no tratamento de esgotos, além de outras utilizações.

hidrólise em altas temperaturas. Uma vez ocorrida a hidrólise, a reação é autocatalisada. Compostos químicos como soda cáustica ou detergente alcalino contendo soda cáustica, não são recomendados para a remoção de impurezas ou rótulos. O composto alcalino frequentemente é absorvido pelo grão de PET, principalmente se após esta operação for feita uma lavagem com água quente. Após a lavagem, o reciclador poderá produzir um PET claro, com um mínimo de degradação na cadeia macromolecular. No entanto, após a próxima extrusão, depois de seco, o PET poderá degradar substancialmente devido à ação catalítica exercida pelo agente de limpeza em direção à hidrólise do polímero [9-11].

A degradação da cadeia macromolecular forma moléculas de baixa massa molar, como ácido carboxílico e outros grupos funcionais. Esses ácidos, posteriormente, catalisam hidrólises tornando o processo de degradação autossuficiente. Na Figura 5 está exemplificada uma possível reação de degradação do PET [9-11].

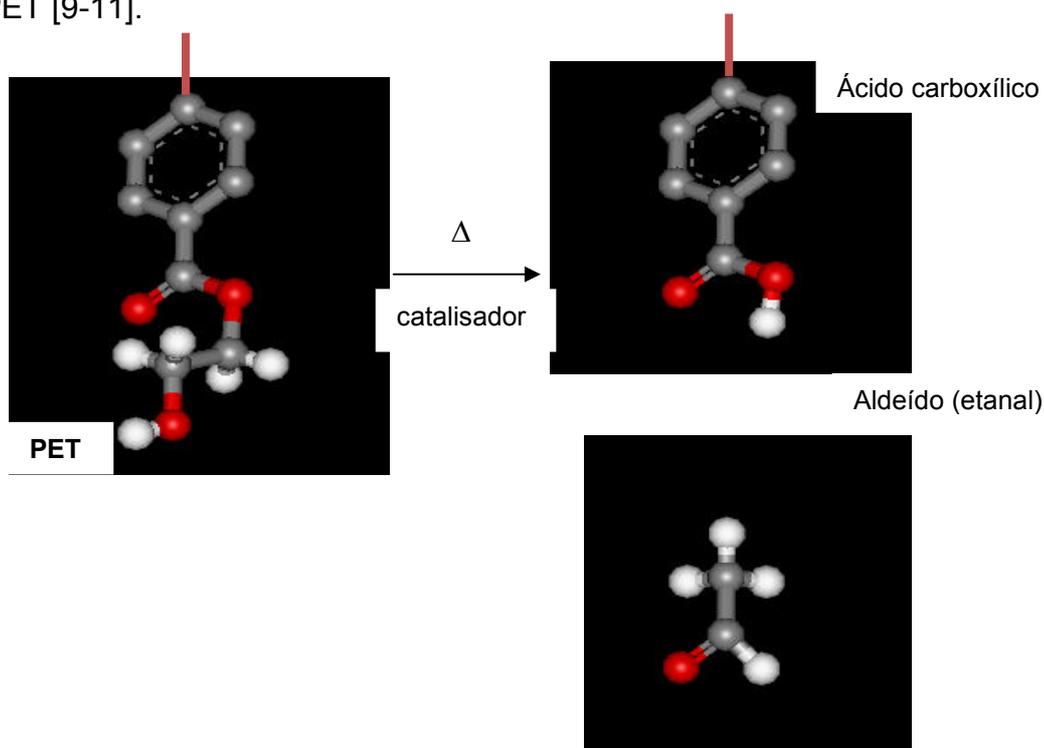


Figura 5 - Reação de degradação do PET com formação de ácido carboxílico e aldeído. [9-11]

Fonte: O Autor, 2011.

De um modo geral, o processo de reciclagem mecânica do PET pode ser resumido em [2, 3, 12]:

- ▶ *Recuperação*: nesta fase, as embalagens que seriam lançadas no lixo comum são separadas por cor e prensadas. A separação por cor é necessária para que os produtos resultantes do processo tenham uniformidade de cor, facilitando assim, sua aplicação no mercado. A prensagem, por outro lado, é importante para que o transporte das embalagens seja viabilizado;
- ▶ *Revalorização*: nesta fase, as garrafas são moídas ganhando valor no mercado. O produto que resulta desta fase é o floco da garrafa. Pode ser produzido de maneiras diferentes e, os flocos mais refinados, podem ser utilizados diretamente como matéria-prima para a fabricação dos diversos produtos que o PET reciclado dá origem na etapa de transformação. No entanto, há possibilidade de valorizar ainda mais o produto, produzindo os grãos de PET reciclado. Desta forma o produto fica muito mais condensado, otimizando o transporte e o desempenho na transformação.
- ▶ *Transformação*: é a fase em que os flocos, ou o granulado, será transformado em um novo produto, fechando o ciclo. Os transformadores utilizam PET reciclado para fabricação de diversos produtos, inclusive novas garrafas para produtos não alimentícios.

2.5 Revisão bibliográfica – trabalhos acadêmicos sobre reciclagem de PET

Na literatura encontramos usos bastante variados para os resíduos de PET. Choi *et al.* [13], por exemplo, citam o uso de resíduos de garrafas de PET, combinados com cinzas de fornalhas, em misturas com cimento para a formação de agregados de concreto de baixa densidade. Por sua vez, Silva *et al.* [14] testaram a durabilidade de fibras de PET reciclado em composições de cimento.

Considerando as valiosas matérias-primas que podem ser obtidas para diferentes processos químicos, Yang *et al.* [15] conduziram a despolimerização metanólica de resíduos de PET em autoclave, em temperaturas de 523-543 K e pressões entre 8,5-14,0 MPa. Os autores conseguiram obter produtos sólidos (dimetil-tereftalato, principalmente; além de quantidades menores de metil-(2-hidroxiethyl) tereftalato, bis(hidroxiethyl) tereftalato, dímeros e oligômeros) e produtos líquidos (etilenoglicol e metanol).

Ghaemy e Mossaddegh [16] despolimerizam resíduos de PET na forma de fibras usando excesso de etilenoglicol (EG) em presença de um acetato metálico como catalisador. As reações de glicólise foram conduzidas em atmosfera de nitrogênio por um período de tempo de até dez horas. As influências do tempo de reação, volume de EG, tipo e concentração do catalisador foram determinadas. Kiliñç *et al.* [17] realizaram a despolimerização de garrafas de água de PET pós-consumidas em presença de etilenoglicol (EG) e acetato de zinco como catalisador. A reação de glicólise foi conduzida com diferentes razões PET/EG a fim de se obter poliésteres para uso como plastificantes de poli(cloreto de vinila) (PVC). De acordo com os autores, os produtos obtidos podem servir como plastificantes secundários juntamente com o di-iso-octil-ftalato (DOP) em composições de PVC.

Shukla e Harad [18] conduziram a despolimerização de resíduos de PET, na forma de fibras e garrafas de bebidas, através de aminólise usando excesso de etanolamina em presença de diferentes catalisadores (ácido acético glacial, acetato de sódio e sulfato de potássio). O principal produto obtido foi o bis(2-hidróxiethyleno tereftalato) (BHET), o que torna a rota química viável economicamente, pois, segundo os autores, o BHET é um importante intermediário químico para outras reações de interesse comercial. Em outro trabalho, Shukla *et al.* [19] estudaram a reciclagem química de fibras de resíduos de PET. A despolimerização foi conduzida em excesso de etilenoglicol usando-se sulfato de sódio como catalisador. Segundo os autores, um elevado rendimento (>60%) em BHET foi obtido. Posteriormente, o BHET foi convertido, por meio de reações químicas apropriadas, em um corante hidrofóbico útil para a coloração de fibras têxteis como poliéster, náilon, acetato de celulose e fibras acrílicas.

Pardal e Tersac [20, 21] conduziram estudos sobre a reação de glicólise de resíduos de PET usando excesso de dietilenoglicol (DEG) em ausência e presença de catalisador. Os resultados mostraram uma forte influência das condições experimentais (temperatura e catalisador) na reação de despolimerização. Por outro lado, a morfologia inicial dos resíduos não afeta de maneira significativa a velocidade de reação.

Fonseca *et al.* [22] conduziram a glicólise de granulados de resíduos de PET com excesso de etilenoglicol na presença de diferentes substâncias químicas (acetato de zinco, carbonato de sódio, bicarbonato de sódio, sulfato de sódio e sulfato de potássio), as quais agiram como catalisador. Os autores obtiveram altos rendimentos em termos do monômero bis(2-hidróxietileno tereftalato) quando acetato de zinco e carbonato de sódio são usados e a reação de despolimerização é realizada a 196°C.

Iyim *et al.* [23, 24] investigaram o efeito de resíduos de PET na preparação de resinas fenólicas. Eles observaram que quantidades otimizadas de PET aumentam as propriedades mecânicas dos moldados, tais como resistência à compressão e dureza. Além disso, também foi observado um aumento na estabilidade térmica das resinas com a inibição da degradação até 370°C. Ertas e Güçlü [25] despolimerizaram resíduos de PET usando etilenoglicol em presença de acetato de zinco como catalisador. Os produtos da glicólise foram usados para gerar resinas alquídicas através de reação com anidrido ftálico, pentaeritritol (um poliol branco e cristalino) e um ácido graxo.

Kalfoglou *et al.* [26] estudaram a eficiência de quatro tipos de compatibilizantes para a mistura de resíduos de PET e polietileno de alta densidade (HDPE). De acordo com os dados de desempenho mecânico e análise morfológica, os autores sugerem que o metacrilato de glicidila é o compatibilizante mais efetivo. Ávila e Duarte [27] também conduziram misturas entre resíduos de PET, provenientes de garrafas pós-consumo, e o HDPE. Os dados experimentais obtidos mostraram um bom desempenho mecânico em termos de resistência à compressão.

Santos e Pezzin [28] incorporaram fibras de PET reciclado em polipropileno (PP). Compósitos de PP/PET com 3%, 5% e 7% em massa de PET foram

preparados em extrusora de rosca única e injetados. De acordo com os autores, houve uma boa dispersão das fibras, porém sem interação entre as fases. Zdrzilova *et al.* [29] estudaram a compatibilização de misturas entre o PP e PET pós-consumo através do uso de anidrido maleico (MA). Segundo os autores, as propriedades viscoelásticas, medidas por reômetro do tipo cone e placa, sugerem que há um aumento na interação entre os componentes da mistura quando MA está presente.

Zhang *et al.* [30] produziram misturas entre PET reciclado e polietileno linear de baixa densidade (LLDPE) utilizando compatibilizantes – poli(estireno-etileno/butadieno-estireno) (SEBS) e poli(estireno-etileno/butadieno-estireno) graftizado com anidrido maleico (SEBS-g-MA). Propriedades mecânicas e a cristalinidade das misturas foram avaliadas. De acordo com os autores, o uso de SEBS-g-MA foi mais efetivo no desempenho mecânico (resistência ao impacto e alongamento na ruptura) das misturas.

Torres *et al.* [31] compararam propriedades térmicas (temperatura de transição vítrea, temperatura de fusão e cristalinidade) e propriedades mecânicas (módulo de Young, alongamento na ruptura e resistência ao impacto) de garrafas de PET pós-consumo e garrafas de PET produzidas com a resina virgem. As diferenças encontradas foram atribuídas à cristalinidade, presença de impurezas e história termomecânica do PET pós-consumo.

Baxi *et al.* [32] utilizaram resíduos de PET em misturas de PET virgem com poli(tereftalato de butileno) (PBT). Uma boa combinação de propriedades de tensão e impacto foram observadas, o que permitiu aos autores sugerir a viabilidade técnica e econômica de tais misturas.

Pegoretti *et al.* [33] produziram compósitos usando uma matriz de PET reciclado e montmorilonitas (natural e modificada com sal de amônio quaternário). Usando o processo de intercalação no estado fundido, os autores observaram uma melhoria na estabilidade dimensional dos compósitos obtidos.

2.6 Fibras têxteis químicas

A classificação das fibras utilizadas na indústria têxtil vem ganhando novas mudanças ao longo do tempo, no início eram somente as fibras naturais de origem animal e vegetal, depois surgiram as fibras químicas artificiais que eram proveniente das fibras naturais vegetais e que passavam por um processo de regeneração para ganhar novas características e propriedades só depois surgiram as fibras químicas sintéticas. As fibras sintéticas hoje mais utilizadas na indústria têxteis são: acrílico, náilon, poliéster, polipropileno, poliuretano e Kevlar, todas essas são originárias da petroquímica [34-36].

As fibras químicas foram desenvolvidas inicialmente com o objetivo de copiar e melhorar as características e propriedades das fibras naturais. À medida que suas aplicações foram crescendo, elas se tornaram uma necessidade, principalmente porque o crescimento da população mundial passou a demandar vestuários confeccionados com rapidez e a um custo mais baixo, reduzindo, ao mesmo tempo, a vulnerabilidade da indústria têxtil às eventuais dificuldades da produção agrícola [34].

Com a evolução do mercado da Moda, fomentada pela indústria têxtil, houve muitas misturas poliméricas para satisfazer as tendências e as necessidades do mercado dinâmico da moda. Essas misturas são de fios e de fibras e geralmente adquiridas na fiação de filatórios de anéis (chamada fiações a seco ou físicas), pois não utilizam nenhum processo químico na confecção dos fios.

Hoje, o mercado têxtil consome uma enorme quantidade de fibras sintéticas. Essas fibras chegaram ao Brasil na década de 1950, mas foi a partir da década de 1960 que obtiveram um crescimento considerado. A primeira fibra sintética produzida no Brasil foi a poliamida, cujo nome comercial é Nylon. Nos anos seguintes surgiram os poliésteres em filamentos e fibras cortadas. É exatamente o poliéster que assume hoje um papel muito importante na indústria têxtil, uma vez que essa fibra pode custar cerca de 4 vezes mais barata do que o algodão [35, 36].

Inicialmente considerada como uma alternativa barata para o algodão, a produção de fibras artificiais praticamente se estagnou, em parte pelo predomínio

crescente das fibras sintéticas e em parte porque seu processo produtivo é altamente poluente devido ao uso intensivo da soda cáustica. Ainda assim, as fibras artificiais de base celulósica (acetato e a viscose) são largamente utilizadas. A viscose se parece com o algodão em absorção de umidade e resistência à tração; apresenta toque suave e macio e um caimento comparável.

O mercado das fibras sintéticas está em plena ascensão tecnológica. Essas fibras são produzidas a partir de resinas derivadas do petróleo e o poliéster *vem puxando a fila* por ser a fibra sintética de maior consumo no setor têxtil, representando pouco mais de 50% da demanda total de fibras químicas.

Para a fiação de poliéster podemos citar dois grandes sistemas: o sistema químico e o sistema físico. No sistema químico são obtidos grandes “spinerets”, que é o fio extrudado; no sistema físico, há rotores e/ou filatório de anel. As fibras obtidas podem ser foscas ou brilhantes e com variações no encolhimento, na seção transversal, na afinidade pelos corantes, como também com baixa formação de “pilling”; as fibras também podem ser “tingidas” antes da extrusão e destinadas para usos especiais [34, 35].

A fibra de poliéster apresenta elevada resistência à umidade e aos agentes químicos (ácidos e álcalis), é não-alérgica e possui grande resistência à tração. A adição de 10% dessa fibra ao algodão resulta em um aumento de 8% na resistência do fio, permitindo significativo aumento na velocidade do processo têxtil, o que se traduz em maior produtividade [34, 35].

Outra fibra importante é a de poliamida. Ela é considerada a mais nobre das fibras sintéticas por apresentar um grande leque de opções tanto em nível de diferentes propriedades como em relação às características físico-químicas intrínsecas. A poliamida apresenta uma elevada resistência mecânica (aproximadamente 3,5 vezes superior ao algodão) que a torna adequada à fabricação de tecidos para moda praia, moda íntima (*lingerie*), artigos esportivos, dispositivos de segurança (paraquedas, cintos de segurança para veículos etc.). Outras características são a baixa absorção de umidade, a possibilidade de texturização e a boa aceitação de acabamentos têxteis, o que permite a obtenção de tecidos com aspectos visuais diferenciados [34].

O poliuretano é um filamento sintético conhecido por sua excepcional elasticidade e também merece destaque. Com o nome de *lycra*, esta fibra ganhou o mundo com sua leveza e conforto marcantes [34].

As fibras elastoméricas presentes no mercado, exercem um papel complementar em relação às demais fibras têxteis (naturais ou químicas). Sua função específica é conferir elasticidade aos tecidos convencionais (de malha ou planos), o que permite confeccionar peças de vestuário que aderem ao corpo, acompanhando-lhe as formas sem tolher os movimentos. Essa característica as torna particularmente apropriadas à confecção de roupas de praia, roupas femininas e esportivas, roupas íntimas, meias e artigos para aplicações médicas e estéticas, essas fibras possuem grande elasticidade (podem atingir até 5 vezes seu tamanho normal sem se romperem), resistência à abrasão e à deterioração pela ação de detergentes, loções, transpiração e diversos produtos químicos. Sua utilização se faz sempre em combinação com outras fibras convencionais em proporções que variam entre 5 e 20% [34].

Ainda há outras fibras sintéticas com visibilidade na janela da moda, como o acrílico, o *lurex* (tecido composto por lã, com alumínio vaporizado, dando um aspecto de brilho metálico resgatado do anos 1970 para o inverno de 2010) e o *Kevlar* (marca registrada da DuPont para uma fibra sintética de aramida muito resistente e leve).

2.7 Poliéster e suas funções oferecidas para a indústria têxtil

Na parte química estrutural os monômeros do poliéster geralmente são o ácido tereftálico e o etilenoglicol. O produto dessa reação de policondensação é fiado em fieiras (*spinnerets*) com ar quente e, em seguida estirado. As cadeias ficam muito orientadas e cristalizadas tornando a fibra altamente compactada e coesa, o que dificulta a penetração de corantes [34-37].

Algumas das exigências, observações e cuidados para os fios de poliéster na indústria têxtil são [37]:

- ✓ Alta resistência a tensão;
- ✓ Alta resistência ao calor (acima de 200°C);
- ✓ Alto ponto de fusão (250/260°C);
- ✓ Excelente resiliência;
- ✓ Boa resistência à abrasão;
- ✓ Boa estabilidade e solidez à luz;
- ✓ Boa resistência aos ácidos e aos microorganismos;
- ✓ Tratamentos alcalinos em altas temperaturas podem destruir a fibra;
- ✓ Cadeia cristalina muito compacta e orientada, o que dificulta a adsorção do corante;
- ✓ Tingibilidade com corantes dispersos, sem grupos iônicos e aplicados em dispersões;
- ✓ Podem oferecer diversos títulos e atenderem a uma gama de texturas repleta de formatos diferentes.

2.8 Corantes e Pigmentos utilizados na indústria têxtil

Dentro da indústria têxtil a transferência da coloração ao substrato é um setor que requer constantes estudos em função das misturas poliméricas. Cada fibra tem sua própria *receita* de tingimento. Os “colorantes” para qualquer substância sólida ou líquida são aplicados para dar cor a um determinado material e podem ser do tipo “pigmento” (insolúvel) ou “corante” (solúvel) [38].

Os pigmentos têm sido utilizados pelo homem com finalidades decorativas e artísticas desde os tempos pré-históricos. Eram extratos naturais retirados de plantas ou minerais. Apenas no século XVIII começaram a surgir os primeiros pigmentos sintéticos. No século seguinte surgiram as primeiras indústrias de pigmentos, com aplicações principalmente na indústria têxtil. A utilização de

pigmentos em polímeros coincide com o surgimento destes, a partir de resinas fenólicas, no início do século XX [38].

Além de conferir cor, os pigmentos podem aumentar o brilho, aumentar a opacidade ou ter outros efeitos aditivos como, por exemplo, estabilidade à radiação ultravioleta. Este último é o caso do negro de fumo, que atua simultaneamente como pigmento preto, estabilizante de luz e reforço em muitos polímeros [38].

É possível subdividir os pigmentos em quatro categorias gerais [38]:

- ▶ Pigmentos orgânicos;
- ▶ Pigmentos inorgânicos;
- ▶ Pigmentos solúveis;
- ▶ Pigmentos especiais.

Os pigmentos especiais consistem de uma mistura de pigmentos visando efeitos como fluorescência, aspecto metálico, efeito perolizado, etc. Normalmente os pigmentos orgânicos são solúveis no polímero fundido enquanto os inorgânicos são insolúveis [38]. A Tabela 2 compara as propriedades gerais destes dois tipos de pigmentos.

A Tabela 3 mostra os principais tipos de pigmentos utilizados e o percentual de consumo. A terminologia empregada em muitos tipos (como “amarelo de cromo”) é simplificada, referindo-se ao metal base e à cor obtida, para se evitar termos mais complicados. Informações detalhadas sobre as propriedades físicas e químicas dos diversos tipos, índice de cor (*colour index*) e aplicabilidade devem ser obtidas na literatura especializada e em catálogos de fabricantes [38].

Tabela 2 - Comparação entre pigmentos orgânicos e inorgânicos [38]

Critério	Inorgânico	Orgânico
Custo	Baixo	Elevado
Propriedades ópticas	Opaco	Translúcido
Dispersabilidade	Fácil	Difícil
Estabilidade à luz e ao calor	Excelente	Limitada
Brilho	Fosco	Brilhoso
Poder de recobrimento	Fraco	Forte
Tendência à migração	Reduzida	Elevada

Fonte: O Autor, 2011.

Tabela 3 - Distribuição do consumo dos pigmentos [38]

Tipo	Percentual de consumo
Pigmentos inorgânicos	75,2
Dióxido de titânio	68,2
Óxido de ferro	2,4
Compostos de cádmio	1,4
Amarelo de cromo	1,4
Laranja de molibdato	1,0
Outros	0,8
Pigmentos orgânicos	23,1
Negro de fumo	19,8
Azul de ftalocianina	1,1
Vermelhos orgânicos	1,0
Verde de ftalocianina	0,6
Outros	0,6
Pigmentos solúveis	1,7

2.8.1 Corantes para poliéster e PET

Os corantes começaram a ser obtidos inicialmente a partir de fontes naturais, principalmente de fontes vegetais ou animais. As propriedades de muitas destas substâncias estavam longe do ideal para as aplicações pretendidas, problema que se somava à indisponibilidade – ou comercial e/ou por exaustão das fontes. Tal conjunto de problemas conduziram ao desenvolvimento de corantes sintéticos com propriedades superiores tecnicamente, de baixo custo e rápida obtenção, independente de clima, ecologia ou mesmo rotas comerciais. Mas as pesquisas se impulsionaram e o primeiro corante sintético foi descoberto por um feliz acaso [39].

No ano de 1856, William Henry Perkin tentava preparar o alcalóide quinina em seu laboratório, mas seu trabalho experimental resultou na obtenção de um corante sintético hidrossolúvel, adequado ao tingimento de seda. Posteriores descobertas se sucederam e, até então utilizados em abundância e por séculos, os corantes naturais foram quase que completamente substituídos pelas substâncias sintéticas ao início do século XX. Atualmente, em especial em usos massivos, praticamente todos os corantes e pigmentos encontrados na indústria e comércio são substâncias sintéticas orgânicas [39].

Dentro do contexto do projeto de reciclagem de poliéster e o poli(tereftalato de etila), devemos apresetnar o funcionamento de como se consegue tingir tais polímeros. Ao contrário de outras fibras, a fibra de poliéster não possui um grande quantitativo de grupos polares e, por este motivo, não pode ser tinta por mecanismos iônicos, com corantes hidrossolúveis como os ácidos, catiônicos, diretos e etc. Somente é possível tingir poliéster e PET com corantes dispersos, não-iônicos e praticamente insolúveis em água fria. Esses corantes dispersos são aplicados em dispersões aquosas, sendo que o tamanho das partículas é de 0,5 a 1 µm. Eles têm limitadíssima solubilidade em água fria [19, 38, 39].

Uma dispersão estável de tão pequenas partículas só é possível mediante a adição de agentes dispersantes, os quais formam uma camada protetora ao redor das partículas de corantes, prevenindo contra uma aproximação destas, o que ocasionaria uma aglomeração dos corantes em tingimentos com resultado

desfavoráveis. Os dispersantes são incorporados na finalização dos corantes, durante a moagem, após a síntese. Nos processos de tingimentos são também empregados dispersantes [19, 38, 39].

Uma lista de propriedades dos corantes dispersos é resumidamente exposta abaixo [39]:

- ✓ Corantes não-iônicos, apolares;
- ✓ Estrutura química azo ou antraquinônico;
- ✓ Solubilidade: poucos mg/L em água fria, aumenta com o aumento de temperatura podendo alcançar bem mais que 100mg/L na temperatura de tingimento;
- ✓ Sublimação: é a única classe de corante que tem essa propriedade, isto é, mediante calor seco passam do estado sólido (como se encontram na fibra após tingimento) para o estado gasoso. A sublimação pode ocorrer durante a termofixação ao substrato.

Na deposição do corante à fibra temos um fator muito importante que é o princípio óptico da coloração. Dentro de um estudo a cor obtida pela adição de pigmentos depende da absorção e espalhamento (refletância) de luz incidente na amostra. Os pigmentos solúveis absorvem, mas não espalham a luz, uma vez que o requisito para o espalhamento – certo tamanho mínimo de partícula – não existe na solução molecular. Os artigos com estes pigmentos são, então, transparentes ou translúcidos, cujas tonalidades dependem da absorção da luz pela matriz. Absorção completa resulta em tonalidades escuras, enquanto que a absorção seletiva resulta em tonalidades coloridas [38].

Se o índice de refração do pigmento difere apreciavelmente do polímero e se certo tamanho de partícula está presente, então, ocorre a refletância. O polímero inicialmente transparente se torna branco e opaco, ou colorido e opaco, dependendo da absorção seletiva de luz pelo pigmento. Não ocorre refletância se o tamanho de partícula for muito pequeno ou muito grande (e localizado). O tamanho da partícula também influi na tonalidade de cor obtida. As curvas de refletância na região do visível para várias tonalidades de cores estão mostradas na Figura 6 [38]

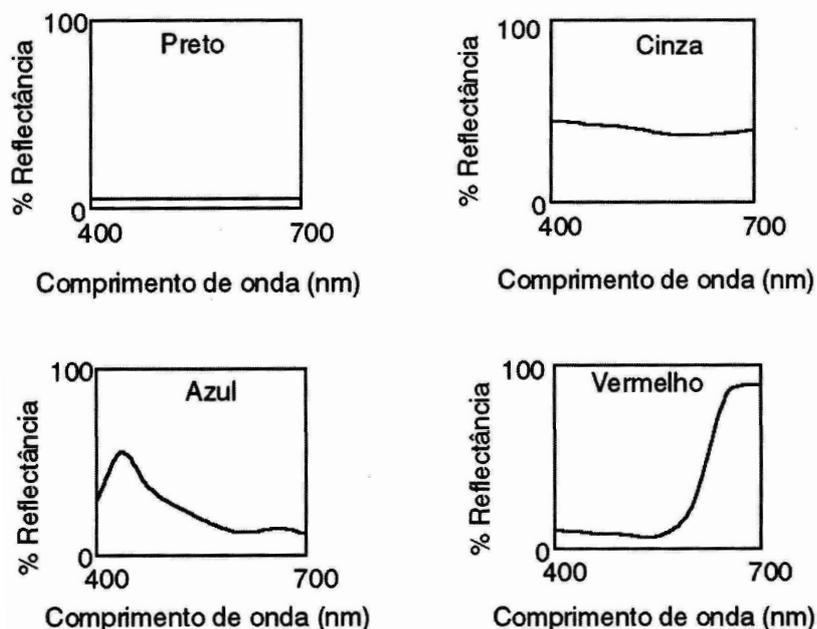


Figura 6 - Curvas de refletância para algumas tonalidades de cor [38]
 Fonte: O Autor, 2011.

A absorção de determinados comprimentos de onda pelo aditivo está relacionada com as transições eletrônicas entre os vários orbitais moleculares; a probabilidade destas transições determina a intensidade da cor. O grupo químico do pigmento que provoca a coloração chama-se *cromóforo*. Nos pigmentos orgânicos os principais cromóforos são: $-\text{NO}$, $-\text{N}=\text{N}-$, $-\text{C}=\text{C}-$, $\text{C}=\text{O}$, etc. A maioria dos compostos orgânicos absorve na região do ultravioleta, sendo, portanto, sem cor. Centros conjugados de insaturação na molécula tornam os elétrons mais móveis, podendo ter transições eletrônicas em comprimentos de onda maiores (energia menores), daí poderem absorver na região do visível e não apenas na região do ultravioleta. Substituintes na molécula como grupos $-\text{OH}$, $-\text{NH}_2$, $-\text{Cl}$, $-\text{CN}$, etc., também afetam a absorção seletiva de luz. Os diferentes grupos possibilitam as tonalidades e intensidades de cores ideais. As combinações são ilimitadas [38].

3 MATERIAIS E MÉTODOS

As matérias-primas utilizadas neste projeto foram: fios fabricados a partir de resíduos sólidos de PET e poliéster reciclado. Os resíduos sólidos de PET (embalagens e garrafas de bebidas carbonatadas) foram coletados junto aos centros de coleta seletiva e manufaturados pela empresa UNIFI (Alfenas/MG), a qual obtém um fio PET de título 78/48 Dtex que representa 90,4% do tecido.

O processo de manufatura é sigiloso, porém, simplificada, pode ser descrito da seguinte maneira - depois de recolhidas, as garrafas são lavadas e separadas por cores, retiram-se rótulos e tampas. Após a secagem, passam por fusão à temperatura de 300°C e, em seguida, filtragem. Para a produção da fibra, é necessária uma nova fusão e processamento em equipamentos como extrusoras e fiadoras (fiação ou *spinning*) para separação em filamentos. Por último, realiza-se a estiragem, transformando a fibra em fio (*yarn*). A fibra de elastano foi fornecida pela empresa Triumph International (Nova Friburgo-RJ); FIO: PUE 22 Dtex que representa 9,6% do tecido.

Na Figura 7 são apresentados os resíduos sólidos de garrafas de PET usados no acondicionamento de bebidas carbonatadas. Tais garrafas foram selecionadas por cor, por densidade, lavados para evitar contaminação e rigorosamente secados em estufas. Na Figura 7 também são apresentados alguns resíduos plásticos que, costumeiramente, dificultam o processo de reciclagem - PP (polipropileno), PS (poliestireno) e PVC (policloreto de vinila), entre outros.

Na Figura 8, o resíduo sólido do resto de produção da sala de corte das confecções e dos processos fabris é apresentado. Vale ressaltar que houve uma rigorosa separação, pois somente pode ter poliéster para a mistura com as garrafas de PET.

Garrafas PET (Resíduos Sólidos) Resíduos de diferentes natureza



Figura 7 - Garrafas PET e outros resíduos sólidos que inviabilizam a reciclagem do poli(tereftalato de etila).

Fonte: O Autor, 2011.



Figura 8 - Resíduos sólidos provenientes da indústria de confecção de poliésteres.

Fonte: O Autor, 2011.

Na Figura 9, é apresentado o fio têxtil obtido por extrusão dos resíduos de PET (garrafas e resíduos da fabricação). O processo consiste em pressionar a resina, em forma pastosa, através de orifícios (*spinneretes*) denominados feiras.

Após passar pelo estiramento ministrado pelo homem, os filamentos que saem ficam automaticamente solidificados e tomam sua posição em cones e carretéis. Esses fios podem ser obtidos no formato de monofilamentos (um único filamento contínuo de espessura capilar) ou multifilamentos (união de pelo menos dois monofilamentos (capilares) contínuos, unidos paralelamente por leves torções) [34-36].



Figura 9 - Fio têxtil produzido usando-se as garrafas PET e o resíduo da confecção de poliésteres.

Fonte: O Autor, 2011.

O fio da Figura 9 obedece aos requisitos técnicos para a confecção de tecidos para moda íntima, além de apresentar uma titulação muito utilizada pela

indústria têxtil que fomenta a moda íntima. Vale ressaltar que mesmo com todos os riscos de contaminação por impurezas que existe numa reciclagem, ainda assim foi possível fazer o fio com um título de 78/68 Dtex⁵, o que é equivalente quase à titulação de microfibras.

Tal observação é importante, pois a microfibras surgiu no mercado por volta de 1990 e esses fios apresentam uma quantidade de capilares maior que o diâmetro do fio, ou seja, os microfilamentos apresentam um numeral maior que o título do fio. Essa equação é bem simples, basta dividirmos o título do fio pelo número de multifilamentos e o resultado deve ser menor que 1. Esse arranjo provoca uma maior flexibilidade no fio e torna ainda maior a resiliência do fio, devido aos interstícios que existem entre um capilar e outro. Por tais razões, atualmente, a microfibras é muito utilizada na indústria de *lingerie*, *fitness*, moda praia, agasalhos esportivos, ternos, entre outros; principalmente, por oferecer muito conforto, maciez e pelo alto poder de resiliência [34-36].

O processo de obtenção do tecido copiou todas as premissas de um tecimento convencional de poliéster. O acompanhamento do processo revelou que no tecimento não há nenhum problema de produção.

A confecção de malhas com os fios de PET reciclado misturado aos de elastano ocorreu nas empresas Triumph International em Nova Friburgo. Foram confeccionados dois tecidos com características semelhantes ao tecido convencional de poliéster utilizando-se o equipamento:

- ⇒ Máquina circular de monofrentura (aparelho para fazer meia-malha convencional). Especificações da confecção: finura 32"; largura 30"; tiragem 52,3 cm/min; largura do rolo 1,0 m; metragem do tecido 120 m.

⁵ O título Tex de um fio é igual ao peso em gramas de 1.000 metros de fio ou de qualquer outro material têxtil. É a representação recomendada pelo Sistema Internacional de Unidades (SI), já que o comprimento é a medida de 1.000 metros de material. Desta forma o material que apresentar massa de 1 grama em tal comprimento, terá como título 1 Tex e assim sucessivamente. É usado também para fibras sintéticas e filamentos. 1 dtex (1 decitex) = 0,1 tex K = 10.000 m/g (fonte: Wikipédia – <http://pt.wikipedia.org>)

Na Figura 10 é apresentado o tecido confeccionado com os fios de PET reciclado misturados ao de elastano.



Figura 10 - Tecido confeccionado com resíduos de garrafas PET e resíduos sólidos de produções fabris juntamente com elastano.
Fonte: O Autor, 2011.

3.1 Tingimento do tecido de PET reciclado

A transposição dos corantes dispersos na fibra de PET envolve certa dificuldade em função de a estrutura ser cristalina e altamente orientada. Porém, existem duas formas de se minimizar o problema da difusão dos corantes. Uma delas é aumentar a acessibilidade da fibra mediante o uso de agentes transportadores denominados “carriers” que temporariamente dilatam os espaços intermoleculares das fibras. No entanto, esse método não foi utilizado nesta dissertação.

Neste estudo, o tingimento foi conduzido dentro do patamar de 135°C que é o método de aumento de temperatura, o qual foi considerado ser um método mais seguro para esse tipo de fibra.

No método de aumento de temperatura, o tingimento é realizado por esgotamento, em aparelhos fechados, em temperaturas de 135°C e sob pressão de aproximadamente 3,5 atmosferas - processo comumente chamado de HT. O poliéster em alta temperatura adquire maior mobilidade em suas regiões amorfas e surgem maiores espaços livres entre os segmentos poliméricos, o que possibilita a difusão do corante.

De acordo com a proposta de tingimento citada, o método por esgotamento ocorreu de forma descontínua. As informações dos aparatos de tingimento e das etapas seguidas são resumidas abaixo:

- Equipamento: autoclave
- Artigo confeccionado: meia-malha
- Volume do banho (VB): 900 litros

Produto	Quantidade	Quantidade real
EMULAGADOR*	1,0 g/L	0,9 kg
ANTIQUEBRADURA	1,0 g/L	0,9 kg

*É um emulsionante para a obtenção de retiradas de óleo e sujeiras de produção.

**Inibidores de vincos, ou agentes anti-quebraduras, provêm boas propriedades antifricção nos processos úmidos e reduzem o impacto mecânico durante os processos de tingimento.

- Após produtos, rodar 5 minutos

Produto	Quantidade	Quantidade real
ÁCIDO CÍTRICO	0,4 g/L	0,36 kg

- Aquecer até 60°C

Utilização dos corantes:

Produto	Quantidade	Quantidade real
Amarelo disperso S-WF	0,1100 %	32,78 kg
Rubi disperso S-WF	0,0278 %	8,28 g
Azul disperso S-WF	0,0375 %	11,18 g

- Dosar os corantes em 10 minutos.
- Elevar a temperatura até 135°C com gradiente de 1,5°C/ minuto. Manter por 45 minutos e, posteriormente, resfriar até 60°C.

Seção de Lavagens:

- Lavar 2 vezes a frio e soltar o banho

Produto	Quantidade	Quantidade real
ANTIQUERADURA	1,0 g/L	0,9 kg
DETERGENTE	1,0 g/L	0,9 kg

- Elevar a temperatura até 90°C e manter por 20 minutos.
- Resfriar até 60°C e soltar o banho.
- Em seguida, lavar uma vez a frio e soltar o banho.

Para fazer o acabamento foi utilizada microemulsão de silicone 5,0 g/L (0,5 kg)

Produto	Quantidade	Quantidade real
MICROEMULSÃO	5,0 g/L	0,5 kg

No gráfico da Figura 11, as etapas do processo de tingimento são esquematizadas. As letras A, B e C são descritas após a Figura 11.

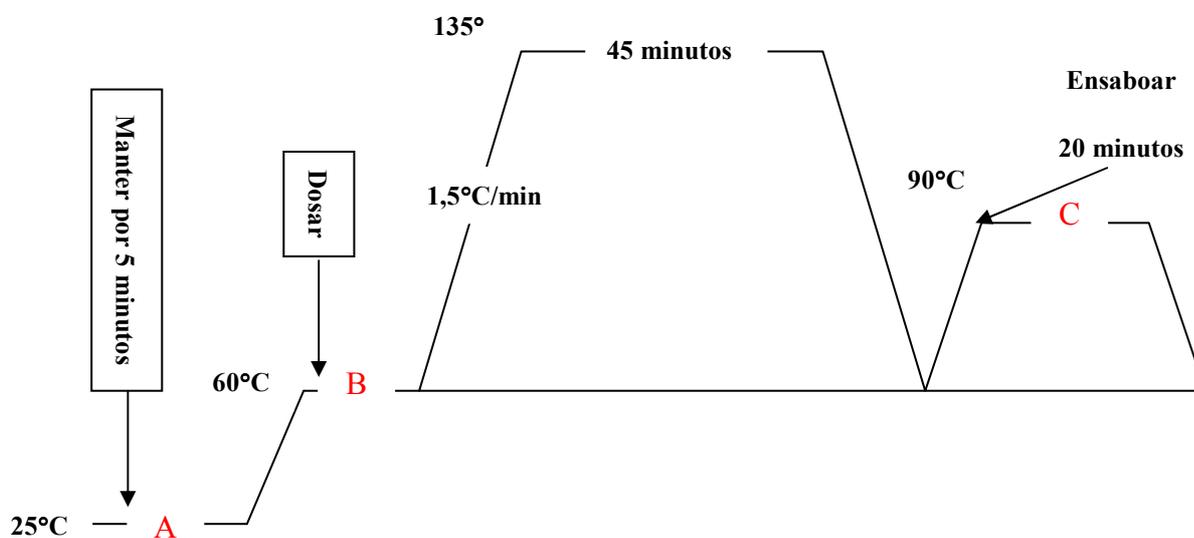


Figura 11 - Gráfico das etapas de tingimento do tecido.
Fonte: O Autor, 2011.

A	B	C
1,0 g/L Emulgador	0,1100% Amarelo Disp S-WF	1,0 g/L Antiquebradura
1,0 g/L Antiquebradura	0,0278% Vermelho Disp S-WF	1,0 g/L Detergente
0,4g/L Ácido Cítrico	0,0375 % Azul Disperso S-WF	

Amostras do tecido de PET reciclado após o tingimento são encontradas no Anexo desta dissertação. Vale ressaltar que escolhemos essa tricromia para atender a uma das cores mais utilizadas no mundo da moda íntima, haja vista que cerca de 60% das peças são feitas nessa coloração. A avaliação e o controle da tonalidade foram conduzidos de forma visual através de comparações com amostras padronizadas existentes e também através do uso de espectrofotômetros.

3.2 Classificação dos corantes dispersos

Os corantes dispersos para poliéster e PET são classificados de acordo com sua estrutura e tamanho molecular em: de baixa, média e alta energia (Grupos B, C

e D). Há um grupo denominado A, que é de muito baixa energia e que são empregados somente para acetato e poliamida, não sendo recomendados para poliéster e/ou PET devido à baixa solidez à sublimação [38, 39].

Os corantes de alta energia têm moléculas muito grandes e, portanto, exigem temperaturas mais altas e conseqüentemente maiores tempos de tingimento. Logo, esses corantes oferecem uma excelente solidez à cor após lavagens e muito boa solidez a sublimação. Por outro lado, os corantes de baixa energia têm moléculas menores, o que explica a sua baixa solidez à sublimação e melhor migração, essa desvantagem é facilmente incorporada a estamparias de *transfer* por sublimação. Os corantes de média energia têm tamanho molecular médio e moderada solidez à sublimação e média migração [39].

Na Tabela 4 estão classificados os corantes dispersos conforme suas características energéticas, estrutura molecular e propriedades de aplicação. Na Figura 12, a estrutura de algumas moléculas de corantes dispersos são apresentadas.

Tabela 4 - Classificação dos corantes dispersos [37, 39]

CORANTES / GRUPOS	B	C	D
Propriedades			
Energia	BAIXA	MÉDIA	ALTA
Molécula	PEQUENA	MÉDIA	GRANDE
Solidez à sublimação	BAIXA/MÉDIA	MÉDIA/BOA	MUITO BOA
Migração	BOA	MODERADA	BAIXA
Difusão na fibra	RÁPIDA	MÉDIA	LENTA
Sensibilidade a variação de afinidade da fibra	BAIXA	MÉDIA	MÉDIA/ALTA
Aplicação			
Esgotamento	Fervura com Carrier e HT (alta temperatura)	Fervura com Carrier e HT (alta temperatura)	Alta temperatura
Intensidade	Clara/média	Média/Escura	Escura
Fixação após o tingimento	Não	Depende da tonalidade	Sim
Processo termosol	Menos indicado	indicado	Indicado

Fonte: O autor, 2011.

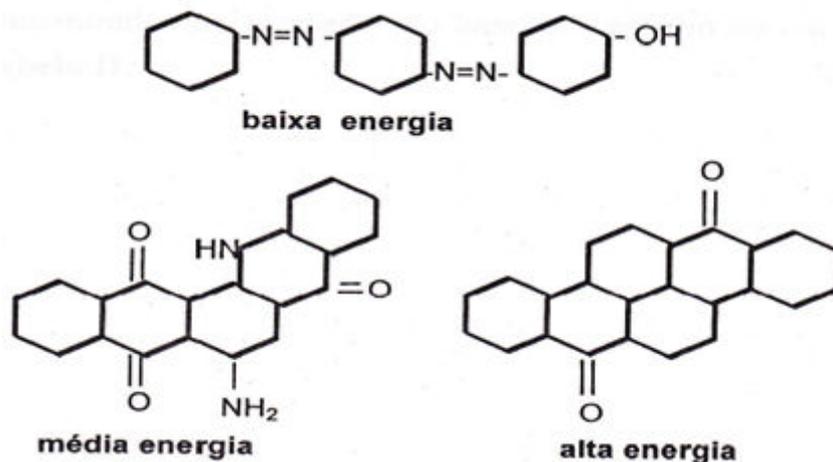


Figura 12 - Diferentes estruturas químicas de corantes de baixa, média e alta energia. [37, 39]
 Fonte: O Autor, 2011.

3.3 Tingimento dos fios de PET reciclado para estudo no SMART LIQUOR

Para a escolha e preparação do banho de tingimento com meadas de fios de PET reciclado para o ensaio no SMART LIQUOR, o mesmo mecanismo de aumento de temperatura e mesmas classes de corantes foram usados.

O *Smart Liquor* é um sistema avançado para análise e otimização de processos de tingimento. Ele consiste em um espectrofotômetro com diversos acessórios para medidas contínuas tanto em linha como individuais. O equipamento possui um *software* poderoso com opção de monitorar até seis tinturas simultaneamente.

Seguindo as condições fabris, o tingimento foi iniciado com a elevação da temperatura até 135°C. A concentração dos corantes total foi estimada em 3% em relação à massa do material, uma vez que o objetivo era atingir uma tonalidade mais escura na tricromia (conjunto de processos fotográficos e fotomecânicos, nos quais todas as cores são obtidas a partir das três cores primárias ou das três cores complementares). Neste processo é possível visualizar o exato momento da

montagem dos corantes individualmente, o que de certa forma nos auxilia para descobrir o real mecanismo de tingibilidade da fibra reciclada.

Os corantes utilizados foram: Rubi Disperso S-WF, Azul Disperso S-WF e o Amarelo Disperso S-WF, todos do mesmo fabricante. O percentual de 1% sobre a massa do material para cada corante foi seguido. Seguindo as especificações do fabricante, a *receita* utilizada para o processo, em um banho de dois litros foi a seguinte:

- ❖ Massa do material: 3g;
- ❖ Volume do banho (copo): 50 mL;
- ❖ Relação de banho: 1:17;
- ❖ Concentração de 3% de corante;
- ❖ Dispersante / equalizante: 3,6 g.
- ❖ Ácido cítrico: 3,6 g. Objetivo: evitar a hidrólise do corante;
- ❖ 0,9 g do corante Vermelho;
- ❖ 0,9 g do corante Azul;
- ❖ 0,9 g do corante Amarelo;
- ❖ Completar volume com água.

A solução foi preparada em um balão volumétrico de 2 litros, justamente para minimizar falhas no processo, sendo que com a mesma solução foram realizados todos os ensaios. Cada partida do tingimento continha 10 amostras, sendo cinco de poliéster comercial (PETc) e cinco de PET reciclado (PETr).

Os ensaios foram realizados no laboratório de colorimetria do SENAI-CETIQT e foi utilizado um equipamento marca Kimak, o qual é uma máquina própria para processos por esgotamento com um bom controle de temperatura.

A Figura 13 demonstra a escala de temperatura em relação ao tempo no processo de tingimento e aponta também os pontos onde foram retiradas amostras do banho para posterior teste *Smart Liquor* – medida do percentual de esgotamento do corante no banho, ou seja, medida da razão de *montagem* do corante na fibra. Esses pontos foram rigorosamente seguidos nos 3 tingimentos com as 5 amostras de cada polímero.

Em 100°C o corante começa a *montar* na fibra e em 133°C (patamar horizontal no gráfico da Figura 13) atinge-se a temperatura ideal de tingimento. Depois de realizado o tingimento, as amostras de fios tintos passaram pelos mesmos processos do tecido.

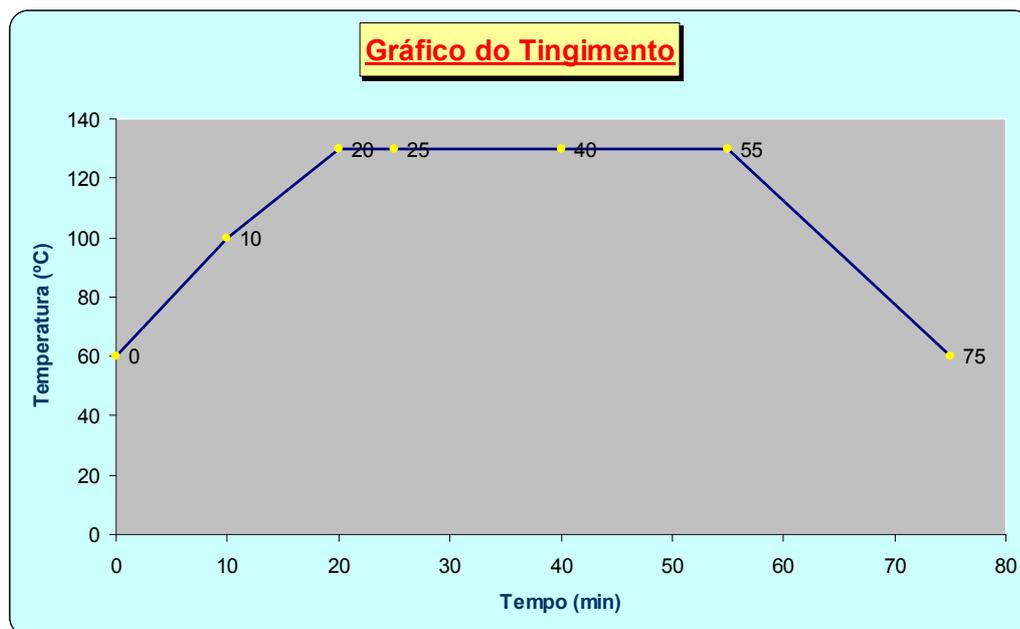


Figura 13 - Processo de tingimento dos fios de PETc e PETr.
Fonte: O Autor, 2011.

Os fios de PET reciclado desenvolvidos pela UNIFI e de poliéster convencional foram enrolados em meadas em um aparelho chamado meadeira na planta piloto de inovação (PPI) do CETIQT. Para os ensaios, foram produzidas 15 meadas de cada fio contendo, aproximadamente, 3 g cada uma. Depois de retiradas as amostras, devidamente separadas em lotes e por tipo de fio, as mesmas foram analisadas por meio de ensaios específicos no Laboratório Físico-Químico do Centro de Tecnologia da Indústria Química e Têxtil (SENAI/CETIQT, RJ) credenciado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Inmetro).

Resumo do Processo do Smart Liquor para medição da incerteza da repetibilidade:

➤ Os tempos de retirada do banho para levar no Smart liquor, foram:

1° - 10 min – 100°C

2° - 20 min – 130°C

3° - 25 min – 130°C

4° - 40 min – 130°C

5 – 55 min – 130°C

Como o processo de montagem e tingimento efetivamente ocorre em temperatura acima de 130°C no tempo de 30 minutos, a primeira amostra é retirada enquanto o corante ainda não começou a montar na fibra. A segunda amostra é retirada quando se atinge a temperatura de 130°C, situação em que o corante já começa a montar na fibra. A terceira amostra é retirada 5 minutos após a temperatura atingir 130°C, onde realmente começa o processo de tingimento. A quarta amostra é retirada 15 minutos após a iniciação da montagem na temperatura de 130°C, o que corresponde a metade do processo de tingimento. Finalmente, a quinta amostra é retirada 30 minutos após a iniciação da montagem na temperatura de 130°C, nesse momento já ocorreu o tingimento e o banho já está bem claro.

Depois de retiradas essas amostras, elas ficaram de repouso por 24 horas para esfriar e só depois que foram levedas para o Smart Liquor para análise.

Esse estudo teve o intuito de medir a repetibilidade dos tingimentos, para conhecermos a real montagem dos corantes nos polímeros. Logo, fizemos 3 baterias de tingimentos com 5 amostras de poliéster convencional e 5 amostras de PET reciclado. Nesse montante tivemos 30 amostras de corpo de prova, sendo 15 para PETc e 15 para PETr.

3.4 Ensaios físicos e químicos nos tecidos

Após a confecção do tecido e o processo de tingimento, os seguintes ensaios físicos e químicos foram conduzidos. É importante ressaltar que o aluno Eleandro Baptista Pinho acompanhou todos os testes e fez considerações importantes, pois o mesmo já estagiou na RIL (Rede Integrada de Laboratórios do CETIQT). A participação do aluno foi autorgado na divisão dos ensaios e no direcionamento dos ensaios escolhidos.

Os ensaios realizados foram:

- ⇒ **Método de teste padrão para densidade linear de fio (número do fio) pelo método Skein (ASTM D1907-07):** esse método é aplicável para fios que alongam menos de 5% quando a tensão atuante sobre o fio é aumentada de 0,25 para 0,75 cN/tex.
- ⇒ **Método para determinação da carga de ruptura e do alongamento no ponto de ruptura para fios (ISO 2062/1972).**
- ⇒ **Ensaios para a solidificação da cor:** nesses ensaios são verificadas eventuais modificações nas cores dos tecidos motivadas por agentes externos como, por exemplo, luz solar, lavagem, suor, água do mar, água clorada, fricção, entre outros. Da mesma forma, em algumas situações, também pode haver migração de cor quando tecidos mais escuros entram em contato com tecidos mais claros. Estes problemas são ocasionados por falhas no processo de tingimento e podem produzir sérios problemas de manchas ou desbote, gerando prejuízos irreparáveis à aparência do tecido.

A solidez da cor pode ser simulada em laboratório. Segue a descrição de algumas dessas características alvo do estudo neste trabalho:

- ⇒ **Solidez da cor à luz (40 h):** determina a característica que o tecido possui de alterar ou não a sua cor mediante a exposição à luz artificial representativa em relação à luz solar. As Normas **ISO 105 - B02:1994** (Materiais têxteis – Determinação da solidez de cor à luz - iluminação com arco de xenônio) e **AATCC 16E** prescrevem o método para conduzir a avaliação;
- ⇒ **Solidez da cor ao suor (NBR 8431; ISO105-E04; ATCC 15):** determina a característica que o tecido possui de alterar e transferir a sua cor após ser submetido aos efeitos de soluções que simulam os efeitos de suor, tanto ácido quanto alcalino;
- ⇒ **Solidez da cor à lavagem (AATCC 61; NBR 10597; ISO 105 E06 B1M):** determina a característica que o tecido possui de alterar ou transferir a sua cor após ser submetido a um procedimento que simula a ação de cinco lavagens;
- ⇒ **Solidez da cor à água clorada de piscina (AATCC 162; NBR 12018; ISO 105 E03):** O ensaio consiste em submeter corpos de prova, de dimensões padronizadas, à solução que simula as condições de água clorada de piscina, avaliando-se posteriormente se houve a transferência ou alteração de cor, por meio de uma escala padrão.
- ⇒ **Solidez da cor à água do mar (AATCC 106 / NBR 10316 / ISO 105 E02):** O ensaio consiste em submeter corpos de prova, de dimensões padronizadas, à solução que simula as condições da água do mar, avaliando-se posteriormente se houve a transferência ou alteração de cor, por meio de uma escala padrão;
- ⇒ **Solidez da cor à fricção (AATCC 8 / NBR 8432 / ISO 105 X125):** determina a característica que o tecido possui de transferir a sua cor após ser friccionado contra um tecido branco;

⇒ **Método para determinação da formação de *pilling* através do aparelho tipo Matindale (NBR 14672/2001):** método utilizado para determinar a tendência a formação de bolinhas nos tecidos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise do desempenho mecânico dos fios de poliéster comercial e PET reciclado

O ensaio de tração é bastante utilizado como teste para o controle das especificações de entrada de matéria-prima. Os resultados fornecidos pelo ensaio de tração são fortemente influenciados pela temperatura, pela velocidade de deformação, pela anisotropia do material, pelo tamanho de grão, pela porcentagem de impurezas, pela presença de cargas, bem como pelas condições ambientais [40].

Em um ensaio de tração, um corpo de prova é submetido a um esforço que tende a alongá-lo ou esticá-lo até à ruptura. Geralmente, o ensaio é realizado num corpo de prova de formas e dimensões padronizadas, para que os resultados obtidos possam ser comparados ou, se necessário, reproduzidos. Este é fixado numa máquina de ensaios que aplica esforços crescentes na sua direção axial, sendo medidas as deformações correspondentes. Os esforços ou cargas são mensurados na própria máquina, e, normalmente, o ensaio ocorre até a ruptura do material (ensaio destrutivo) [40].

Na Tabela 5 estão resumidos os dados obtidos pela análise dos fios de poliéster comercial (PET_c) e PET reciclado (PET_r) de acordo com as normas ASTM D1907-07 e ISO 2062/1972.

Pode ser observado através dos dados da Tabela 4 que há uma diferença pouco significativa de desempenho mecânico entre os fios de poliéster comercial e PET reciclado. A diferença no limite de ruptura entre os fios é de apenas 1,5%. Contudo quando se compara a deformação entre os fios, percebe-se que há, aproximadamente, 41% de deformação a mais para o PET_r nas mesmas condições de ensaio.

A diferença encontrada pode ser explicada pelo grau de alteração imposto às cadeias poliméricas resultado das etapas de fabricação, exposição a elevadas

temperaturas, raios UV, ação de produtos químicos e toda a sorte de intempéries aos quais o PET_r pode ter sido exposto antes de tornar-se um fio têxtil.

Assim, uma eventual degradação dos fios de PET_r resulta, como observado na Tabela 5, em um menor desempenho mecânico.

Tabela 5 - Resistência à ruptura, deformação na ruptura e densidade linear dos fios de poliéster comercial e PET reciclado.

POLIÉSTER COMERCIAL (PET _c)			PET RECICLADO (PET _r)		
Amostra	Limite de ruptura (N)	Deformação (%)	Amostra	Limite de ruptura (N)	Deformação (%)
1	21,18	26,4	1	20,89	28,6
2	21,18	24,6	2	20,89	30,6
3	21,28	26,0	3	20,89	28,6
4	21,28	23,0	4	20,89	30,8
5	21,18	22,6	5	20,99	30,8
MÉDIA	21,22 ± 0,05	24,5 ± 1,7	MÉDIA	20,91 ± 0,04	29,9 ± 1,2
Densidade linear do fio (tex ou g/1.000 m)					
17,8			18,4		

Fonte: O Autor, 2011.

4.2 Análise do processo de tingimento dos fios de PETc e PETr

Durante o processo de tingimento três etapas são consideradas importantes: a montagem, a fixação e o tratamento final. A fixação do corante à fibra é feita através de reações químicas, da simples insolubilização do corante ou de derivados gerados e ocorre usualmente em diferentes etapas durante a fase de montagem e fixação. Entretanto, todo processo de tintura envolve como operação final uma etapa de lavagem em banhos correntes para retirada do excesso de corante original ou corante hidrolisado não fixado à fibra nas etapas precedentes [41].

Na Tabela 6 são apresentados os dados do teste *Smart Liquor*, o qual mede o percentual de esgotamento do corante no banho, ou seja, medida da razão de *montagem* do corante na fibra (o programa do próprio equipamento calculou a média dos cinco corpos de provas ensaiados para cada amostra). Apenas estão representados os resultados dos tingimentos dos corpos de prova das amostras A1, A2 e A3. As amostras A4 e A5 não apresentaram diferenças significativas em relação aos resultados encontrados para a amostra A3.

Tabela 6 - Resultados do ensaio *Smart Liquor* para os fio de poliéster comercial (PETc) e PET reciclado (PETr).

Percentual de rendimento do corante disperso (%)				
Ensaio	Tingimento A1	Tingimento A2	Tingimento A3	Média
PETc				
Corante				
Vermelho	87,6	85,5	85,3	86,1 ± 1,3
Amarelo	91,2	90,1	89,9	90,4 ± 0,7
Azul	91,7	91,9	91,8	91,8 ± 0,1
Total	90,2 ± 2,2	89,2 ± 3,3	89,0 ± 3,3	89,4 ± 3,0
PETr				
Corante				
Vermelho	88,5	87,3	86,9	87,6 ± 0,8

Amarelo	91,9	91,0	90,8	91,2 ± 0,6
Azul	92,8	92,0	92,0	92,3 ± 0,5
Total	91,1 ± 2,3	90,1 ± 2,5	89,9 ± 2,7	90,4 ± 2,4

Fonte: O Autor, 2011.

Através dos dados da Tabela 6 pode ser observado que houve uma boa reprodutibilidade nos ensaios tanto nos fios de PET_c quanto nos fios de PET_r. O desvio-padrão (medida mais comum da dispersão estatística) para os diferentes corantes é pequeno quando a média do rendimento de três tingimentos é calculada.

Além disso, não há evidência de significativa diferença entre o rendimento dos fios de PET_c e PET_r, ou seja, o processo de tingimento (vermelho, amarelo e azul) mostra desempenho equivalente, embora o corante vermelho tenha demonstrado uma *montagem* ligeiramente inferior para os dois fios - entre 86% e 87%.

Uma vez que fios de PET_c e PET_r exibem a mesma interação com os corantes – interações de van der Waals – pode-se concluir que o tingimento dos fios de PET_r, dentro das condições experimentais investigadas, apresentará um rendimento equivalente aos dos fio de PET_c. Desta forma, os valores observados na Tabela 6 são corroborados e a confecção de têxteis com fio de PET_r pode, em princípio, ocorrer pelo processo de tingimento convencional adotado para o poliéster comercial.

Na Figura 14 estão representados os gráficos do processo de tingimento dos fios de PET_c. Na Figura 15 encontram-se os gráficos do mesmo processo para os fios de PET_r.

A aparência similar das curvas tanto para a mesma amostra de fio quanto para amostras diferentes apenas retrata o já discutido em parágrafos anteriores, ou seja, não há evidências experimentais que indiquem uma inviabilidade técnica de tingimento dos fios de PET_r quando comparados ao poliéster comercial.

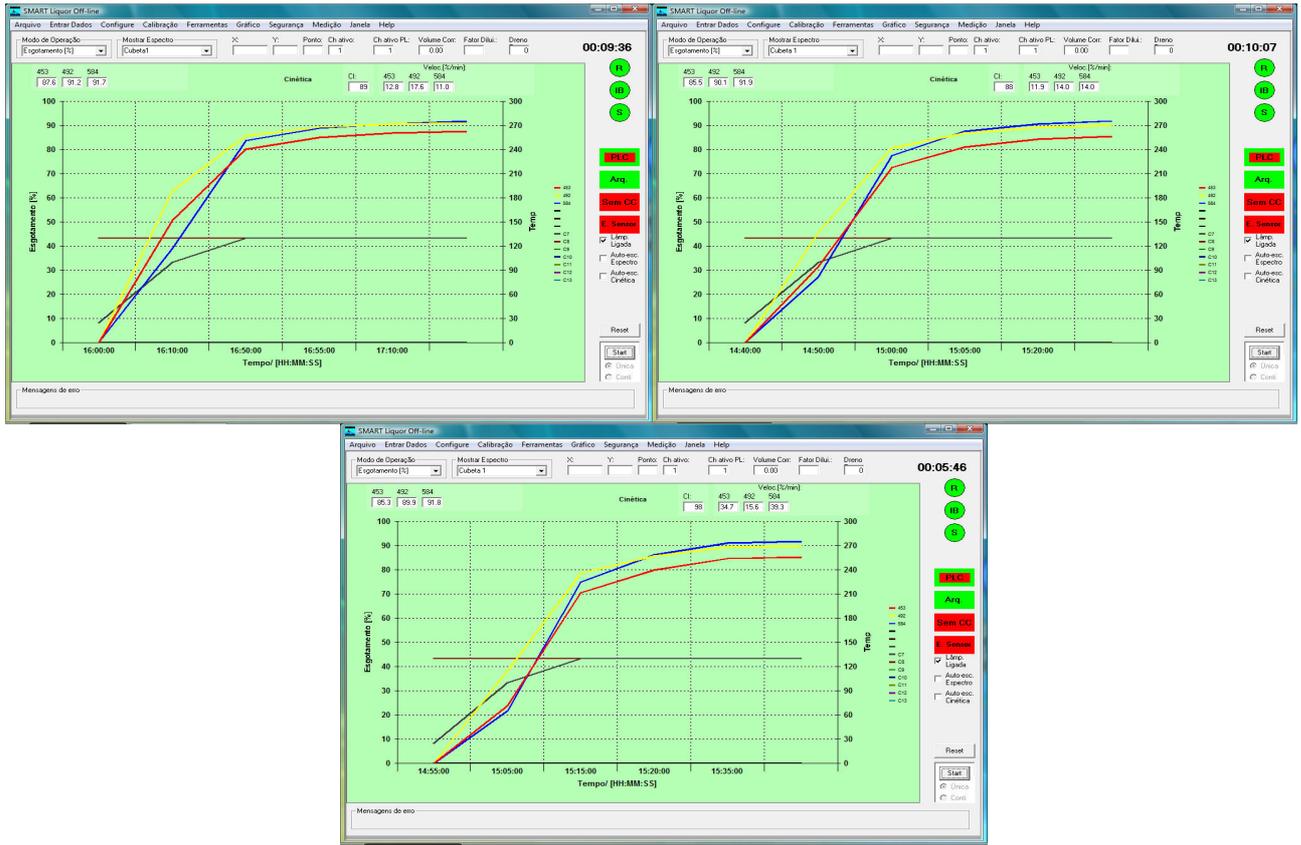


Figura 14 - Processo de tingimento para os fios de PESc.
 Fonte: O Autor, 2011

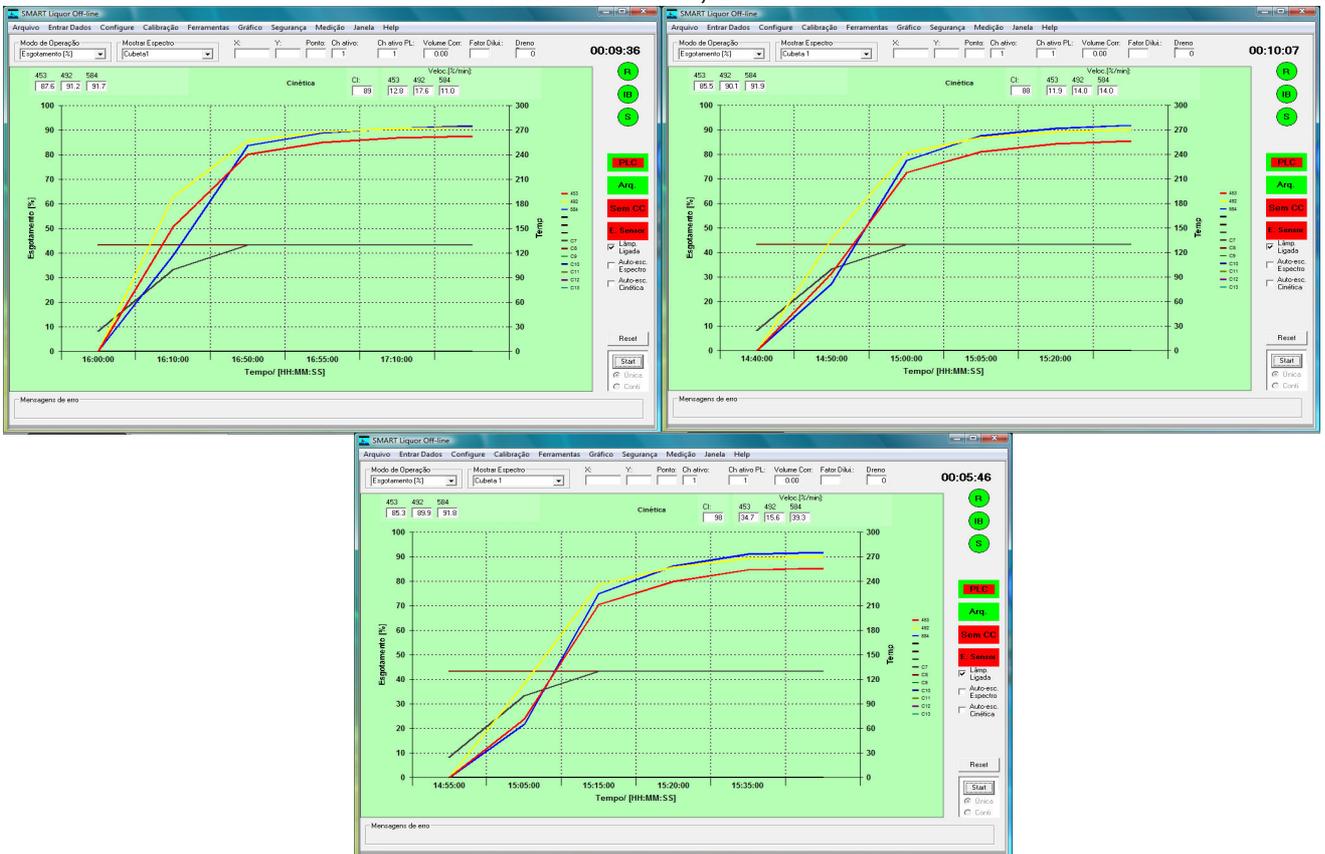


Figura 15 - Processo de tingimento para os fios de PETr.
Fonte: O Autor 2011.

4.3 Análise da solidez do tingimento dos fios de PETr

A cor de um tecido representa a própria *alma* e *vida* do mesmo. O segmento da tinturaria se encarrega desta tarefa. No entanto, nem sempre a cor, após a utilização da peça (tecido), permanece a mesma.

Assim sendo, esta parte do projeto tem a finalidade de conferir o comportamento do tecido de fios de PETr submetido a ensaios que simulam alguns dos esforços físico-químicos encontrados no dia-a-dia. Nas Tabelas 7 e 8 estão resumidos os resultados dos diferentes ensaios.

Os resultados nas Tabelas 7 e 8 são discriminados por valores numéricos que podem variar de 0 a 5, o que representa desde o grau muito ruim ou zero (indesejável) até o grau excelente ou cinco. Essa referência é utilizada para fazer comparações de o quanto a amostra sofreu algum tipo de mudança e/ou o quanto o *tecido testemunha* recebeu da amostra analisada. Mediante esses resultados, podemos nos certificar que o único teste que não ofereceu um grau satisfatório foi a solidez da cor à luz.

Tabela 7 - Resultados da caracterização de solidez à cor

ENSAIOS	NORMAS	ALTERAÇÃO	TRANSFERÊNCIA
SOLIDEZ DA COR À LUZ	ISO 105 B02 (40h)	2	----
SOLIDEZ DA COR AO SUOR ÁCIDO	NBR ISO 105 E04	5	5
SOLIDEZ DA COR AO SUOR ALCALINO	NBR ISO 105 E04	5	5
SOLIDEZ DA COR À LAVAGEM	NBR ISO 105 C06 B1M	4	5
SOLIDEZ DA COR A ÁGUA CLORADA DE PISCINA	AATCC 162	4-5	----
SOLIDEZ DA COR À ÁGUA DO MAR	AATCC 106	5	5

Fonte: O Autor 2011.

Tabela 8 - Resultados da caracterização de solidez da cor à fricção.

SOLIDEZ DA COR À FRICÇÃO	TRANSFERÊNCIA	
	SECO	ÚMIDO
NBR ISO 105 X 12	5	4-5

Fonte: O Autor 2011.

A seguir, os diferentes ensaios são comentados com maiores detalhes.

► Solidez da cor à luz (40 h)

O ensaio segue o método para determinação da solidez de cor de materiais têxteis quando submetidos ao efeito da luz artificial, a qual corresponde ao iluminante padrão D65 (luz do dia).

Nesse ensaio, o material é condicionado e exposto à luz por um período de 40 h. Posteriormente, é levado para comparação com uma escala para solidez à luz padronizada - escala azul que varia de 1 a 8. O valor numérico 1 corresponde à

uma solidez muito baixa enquanto o valor numérico 8 representa o extremo oposto, ou seja, um solidez muito alta. De maneira geral, cada valor ascendente na escala representa o dobro de solidez do valor numérico imediatamente inferior.

Um cuidado para a realização do ensaio é necessidade dos corpos-de-prova e as tiras padronizadas da escala azul terem que apresentar dimensões e formas idênticas, a fim de evitar erros de avaliação - superestimação do contraste entre as áreas expostas e as não expostas à luz de uma amostra com área relativamente grande, em comparação com uma amostra com área relativamente pequena.

O resultado encontrado para os fios de PETr foi classificado como de nível 2. Isto significa que os fios tingidos apresentaram uma solidez de cor ruim. Assim sendo, com uma baixa fixação do corante tais fios não teriam uma atratividade duradoura se sujeitos à luz solar de forma contínua.

► **Ensaio Norma (Alteração / Transferência) - Solidez da cor ao suor ácido e alcalino (AATCC15 / NBR 8431 / ISO 105 E04)**

O objetivo é avaliar a solidez da cor do substrato (PETr) quando submetido à soluções simulando o suor ácido e alcalino. Neste ensaio, a determinação da solidez de cor ao suor é conduzida mediante o uso do aparelho *perspirômetro* (Figura 16).

Uma unidade de *perspirômetro* consiste em uma armação de aço inoxidável, que comporta 30 lâminas separadoras de acrílico ou vidro de 115 x 60 mm. Vinte amostras, normalmente de 100 x 40 mm, são colocadas entre as lâminas, sob uma carga de 5 kg. Para testar a solidez da cor à transpiração, amostras (tecidos, fibras ou fios) em contato com o *tecido multifibra adjacente* (padrão), são tratadas em duas soluções diferentes de histidina, uma alcalina e uma ácida. As amostras são drenadas, sob carga, entre as lâminas separadoras [44].



Figura 16 - Unidade de perspirômetro.[44]
Fonte: RIL /CETIQT, 2001

Devem ser usadas unidades de teste separadas para cada tipo de solução alcalina ou ácida para evitar a possibilidade de mistura entre as duas. Essas unidades são colocadas, então, em uma estufa por 4 horas a uma temperatura de $37 \pm 2^\circ\text{C}$ (temperatura média do corpo humano). Finalmente, as unidades são removidas e as amostras retiradas e secas em estufa. A alteração de cor nas amostras e a transferência para os tecidos adjacentes são avaliadas pela escala cinza, sob luz normalizada com 6500 K em uma cabine de comparação de cores. O valor mínimo de desempenho é considerado 1, enquanto o máximo de desempenho refere-se ao valor 5 [44].

Os resultados encontrados para os fios de PETr referentes à alteração e à transferência enquadraram-se, tanto para o suor ácido quanto para o suor básico, na categoria 5. Desse modo, pode-se concluir que os fios reciclados tingidos responderão de maneira bastante satisfatória quando em contato com o suor.

► **Ensaio Norma (Alteração / Transferência) - Solidez da cor à Lavagem (AATCC 61 / NBR 10597 / ISO 105 E06 B1M)**

O objetivo desse ensaio é avaliar a solidez da cor do substrato (PET-reciclado) quando submetido à lavagem. O processo simula uma lavagem caseira e uma lavagem comercial.

Um equipamento, modelo Washtec, juntamente com um tipo de sabão específico, foi utilizado dentro de condições definidas de temperatura, volume de detergente, pH e tempo. O tecido a ser testado e o tecido testemunha (geralmente, 100% algodão e outro 100% poliéster) são colocados no equipamento e avaliação de transferência e alteração da cor é feita através da comparação do corpo de prova lavado e de um corpo de prova original com uma escala de cinza.

Na escala, o corpo de prova que receber grau 5 corresponde aquele que não apresenta nenhuma diferença entre a amostra lavada e a amostra original. Por outro lado, o valor 1 é dado para aquele corpo de prova que apresentar a maior alteração de cor.

Com base no padrão da escala cinza, os fios de PETr receberam a classificação 4 para alteração e 5 para transferência. Assim, o resultado indica que a alteração não compromete a cor real dos fios tingidos enquanto a transferência permite concluir que há uma excelente solidez da cor dos fios de PETr.

► **Ensaio Norma (Alteração / Transferência) - Solidez da cor à água clorada de piscina (AATCC 162 / NBR 12018 / ISO 105 E03)**

O objetivo desse ensaio é avaliar a solidez da cor do substrato (PETr) quando submetido à uma solução de água clorada, a qual simula a composição de água de piscina.

Com auxílio do equipamento *perspirômetro* e seguindo os mesmos princípios dos ensaios anteriores, esse método consiste em submeter corpos-de-prova de dimensões padronizadas a uma solução de água clorada. Posteriormente, uma avaliação da alteração e/ou transferência da cor original, por meio da escala cinza, é conduzida.

O resultado geral do ensaio classificou os fios de PETr em uma escala intermediária entre 4-5. Tal avaliação é bastante satisfatória, o que permite ao projeto versar sobre o aumento da viabilidade de uso dos fios reciclados. No

entanto, em função dos resultados menos expressivos para a solidez da cor à luz, o substrato deve ser avaliado com cautela quanto à utilização para a linha de moda praia e piscina.

► **Ensaio Norma (Alteração / Transferência) - Solidez da cor à água do mar (AATCC 106 / NBR 10316 / ISO 105 E02)**

Com a ajuda do *perspirômetro* e seguindo os mesmos princípios dos ensaios anteriores, esse método consiste em submeter corpos-de-prova de dimensões padronizadas a uma solução aquosa, com as mesmas características da água do mar, e avaliar se ocorreu ou não alteração e/ou transferência da cor original por meio de uma escala padrão de cinza.

Os resultados encontrados foram considerados excepcionais. Não ocorreu modificação na alteração e nem na transferência. Mais uma vez, o projeto ganha viabilidade técnica e econômica, pois os fios de PETr podem, com base nos resultados, ampliar a gama de usos.

► **Ensaio Norma (Alteração / Transferência) - Solidez da cor à fricção seco / úmido (AATCC 8 / NBR 8432 / ISO 105 X125)**

O objetivo desse ensaio é avaliar a solidez da cor do substrato (PET-reciclado) quando submetido à ação mecânica de fricção. A norma utiliza um aparelho chamado *crockmeter* (Figura 17).



Figura 17 - Aparelho *crockmeter* [44]
Fonte: RIL / CETIQT, 2001

O equipamento é designado para determinar o grau de cor que pode ser transferido da superfície de um material colorido para outras superfícies através de uma fricção. O equipamento leva este nome derivado do termo “crocking” que significa transferência de cor. A amostra de teste pode ser avaliada em condição úmidas ou seca quanto à fricção. A avaliação da transferência de cor é feita usando uma escala cinza (1 – muito ruim até 5 – muito bom).

O resultado deste ensaio também foi satisfatório oferecendo uma boa oportunidade para a utilização do substrato na aplicação de vestuário para moda praia e lingerie. Neste ensaio de solidez à fricção não se avalia a alteração, somente é avaliado o que foi transferido, logo houve um excelente resultado com transferência pequena na escala – classificação 4-5 para a condição úmida e 5 para a condição seca.

De uma maneira geral, os fios de PET_r demonstraram uma boa viabilidade técnica de uso. Os diferentes ensaios de solidez da cor indicam uma boa retenção por parte dos fios tingidos, o que amplia as possibilidades de uso.

Com relação ao baixo desempenho para a solidez da cor à luz, talvez a explicação possa ser encontrada no não uso de **agentes fotoestabilizantes**. Tais substâncias podem ser classificadas como: **primárias** (absorvedores de UV, agentes de filtragem e *HALS*) e **secundárias** (antioxidantes) [45].

Os absorvedores de UV atuam absorvendo a energia luminosa na região do ultravioleta e a dissipando em forma de energia térmica por meio de reações químicas que regeneram o absorvedor. Os filtros, como diz o nome, evitam que a radiação atinja a peça protegida e filtram a luz de comprimento de onda que pode provocar reações fotoquímicas na superfície do polímero. *HALS* é a abreviação usada para “hindered amine light stabilizer”, ou seja, aminas com impedimento estérico. São usadas como estabilizantes contra a luz UV. Os antioxidantes são captadores de radicais livres ou terminadores de reação em cadeia [45].

Como no ensaio os fios de PET_r foram submetidos por um período de 40 horas, de acordo com a norma, à luz e os mesmos não continham fotoestabilizantes, o processo de manutenção da cor dos fios tingidos foi claramente

afetado. O resultado adverso apresentou-se no esmaecimento (perda de cor) dos fios após o período de exposição.

5 CONCLUSÕES

A análise técnica da utilização de fios de PET reciclado (PET_r) na indústria têxtil foi considerada neste projeto. Os ensaios físico-químicos permitiram chegar às seguintes conclusões:

- I. Há pouca diferença entre os fios de PET_r e o poliéster convencional quanto à resistência à tração, pois observamos que houve uma leve diferença comparando com o PET_c, o desempenho ligeiramente inferior dos fios de PET_r deve-se a própria natureza da matéria-prima, ou seja, proveniente de reciclagem primária;
- II. A confecção de têxteis com fio de PET_r pode, em princípio, ocorrer pelo processo de tingimento convencional adotado para o poliéster comercial em função dos resultados demonstrados pelo ensaio no *Smart Liquor*;
- III. A solidez a cor dos fios de PET_r à luz foi considerada ruim como foi mencionado acima, embora os demais ensaios de solidez tenham demonstrado bom desempenho. Talvez a utilização de aditivos bloqueadores de UV possa corrigir tal dificuldade. É necessário realizar testes para aprimorar a classe do corante ao polímero reciclado, uma vez que utilizamos corantes da classe D, que é a classe que oferece maior solidez da cor à luz, mas o que se sabe é que a mistura polimérica que construiu o fio têxtil, após o tingimento não obteve resultado satisfatório em relação a solidez à luz.
- IV. A fim de se assegurar uma forma mais dinâmica de utilização dos fios reciclados, há a necessidade de análise da matéria-prima sempre que esta chegar à indústria têxtil, pois a mesma pode chegar contaminada com outros polímeros e/ou agentes externos.

Alguns pontos relevantes alcançados que merecem um destaque final são:

- I. Não apenas os resultados do teste de ruptura e densidade dos fios foram excelentes, uma vez que estamos trabalhando na formação de fios partindo de matéria-prima reciclada, mas também uma titulação quase equivalente a uma microfibras foi alcançada. Isso é uma *revolução*, considerando a possível contaminação do material reciclado e as dificuldades de extrusão inerentes desse material.
- II. Obteve-se também um excelente tecimento. Acompanhando-se a montagem dos teares, o repasse para as divisões atendendo os 96 cones necessários para compor a máquina, com apenas 3 kg de fio verificou-se todos os elementos de tecimento e a máquina tecendo com uma velocidade natural de produção.
- III. Utilizou-se uma gramatura e uma padronagem bem específica e voltada para o mercado de *lingerie* e linha noite, incluindo a cor, toque e caimento. Os resíduos de PET investigados demonstram perfeita capacidade de atender à demanda do mercado têxtil conforme ilustra a Figura 18.



Figura 18 - Peças confeccionados com o tecido oriundo de fios de PET reciclado (confeções de Nova Friburgo – Suspiro Íntimo)
Fonte: O Autor, 2011.



Figura 19 - Peças confeccionados com o tecido oriundo de fios de PET reciclado (confeções de Nova Friburgo – Suspiro Íntimo)
Fonte: O Autor, 2011

6 SUGESTÕES

Como sugestões para trabalhos futuros, teríamos:

- I. Avaliação de tecidos confeccionados com de fios de PETr misturados com outros fios convencionais presentes na indústria têxtil – por exemplo: fio de algodão, náilon, entre outros.
- II. Ensaio de resistência à degradação natural dos tecidos com fios de PETr – tecidos confeccionados e expostos às intempéries por um período mínimo de seis meses.
- III. Realizar uma análise da morfologia dos fios de PETr e do poliéster convencional por MEV, que é uma caracterização de materiais realizada por um microscópio eletrônico de varredura, esse microscópio eletrônico é capaz de produzir imagens de alta resolução. Devido a maneira com que as imagens são criadas, as imagens de MEV têm uma aparência tridimensional característica e são úteis para avaliar a estrutura dos materiais. É possível que esse ensaio possa nos ajudar a revelar o problema da baixa solidez à luz.
- IV. Avaliação técnica de outros fios gerados a partir de termoplásticos consumidos diariamente de forma extensiva – por exemplo, fios de polietileno e polipropileno.
- V. Estudo de mercado para vislumbrar os possíveis nichos de comercialização dos tecidos de fio de PETr e comparação de custos com os tecidos de poliéster.

Uma importante sugestão que pode ser considerada, embora não tenha um cunho prioritariamente acadêmico, é a construção de uma usina de reciclagem e uma planta de beneficiamento de fios reciclados para atender ao pólo de moda íntima de Nova Friburgo e adjacências.

REFERÊNCIAS

1. MANRICH, S.; FRATTINI, G.; ROSALINI, A. C. **Identificação de plásticos: uma ferramenta para reciclagem**. São Carlos, SP: Editora UFSCar, 1997.
2. GRIPPI, S. **Lixo, reciclagem e sua história**. Rio de Janeiro : Interciência, 2001.
3. Alta tecnologia a serviço do lixo. **Revista Época**, n. 634, p. 22-23. jul. 2010.
4. SPIRO, T. G.; STIGLIANI, W. M. **Química Ambiental**. 2.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
5. CEMPRE. Disponível em: <<http://www.cempre.org.br/>>. Acesso em: maio 2010.
6. HARADA, J. **Moldes para injeção de termoplásticos: projetos e princípios básicos**. São Paulo: Artliber, 2004.
7. WIEBECK, H., HARADA, J. **Plásticos de engenharia, tecnologia e aplicações**. São Paulo: Artliber, 2005.
8. ALBUQUERQUE, J. A. C. – **Planeta plástico: tudo o que você precisa saber sobre plásticos**. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 2001.
9. ABIPET. Disponível em: <<http://www.abipet.org.br/>>. Acesso em: jun. 2010.
10. EMBRAPOL. Disponível em: <<http://www.embrapol.com.br/resina.htm>>. Acesso em: jul. 2010.
11. AMBIENTE BRASIL. Disponível em: <<http://www.ambientebrasil.com.br/>>. Acesso em: ago. 2010.
12. ROMÃO, W.; SPINACÉ, M. A. S.; DE PAOLI, M. A. Poli(tereftalato de etileno), PET: uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e reciclagem. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v.19 (2), p.121-132, 2009.
13. CHOI, Y. W.; MOON, D. J.; CHUNG, J. S.; CHO, S. K. Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p.776-781, 2005.

14. SILVA, D. A.; BETIOLI, A. M.; GLEIZE, P. J. P.; ROMAN, H. R.; GÓMEZ, L. A.; RIBEIRO, J. L. D. Degradation of recycled PET fibers in Portland cement-based materials. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 1741-1746, 2005.
15. YANG, Y.; LU, Y.; XIANG, H.; XU, Y.; LI, Y. Study on methanolytic depolymerization of PET with supercritical methanol for chemical recycling. **Polymer Degradation and Stability**, v. 75, p.185-191, 2002.
16. GHAEMY, M.; MOSSADDEGH, K. Depolymerisation of poly(ethylene terephthalate) fibre wastes using ethylene glycol. **Polymer Degradation and Stability**, v. 90, p. 570-576, 2005.
17. KILINÇ, S.; IYIM, T. B.; EMİK, S.; ÖZGÜMÜS, S. Recycling of waste PET: usage as secondary plasticizer for PVC. **Polymer-Plastics Technology and Engineering**, v. 44, p. 1379-1388, 2005.
18. SHUKLA, S. R.; HARAD, A. M. Aminolysis of polyethylene terephthalate waste. **Polymer Degradation and Stability**, v. 91, p. 1850-1854, 2006.
19. SHUKLA, S. R.; HARAD, A. M.; JAWALE, L. S. Chemical recycling of PET wastes into hydrophobic textile dyestuffs. **Polymer Degradation and Stability**, v. 94, p. 804-809, 2009.
20. PARDAL, F.; TERSAC, G. Kinetics of poly(ethylene terephthalate) glycolysis by diethylene glycol. I. Evolution of liquid and solid phases. **Polymer Degradation and Stability**, v. 91, p. 2840-2847, 2006.
21. PARDAL, F.; TERSAC, G. Kinetics of poly(ethylene terephthalate) glycolysis by diethylene glycol. II. Effect of temperature, catalyst and polymer morphology. **Polymer Degradation and Stability**, v. 92, p. 611-616, 2007.
22. FONSECA, R. L.; INGUNZA, I. D.; RIVAS, B.; ARNAIZ, S.; ORTIZ, J. I. G. Chemical recycling of post-consumer PET wastes by glycolysis in the presence of metal salts. **Polymer Degradation and Stability**, v. 95, p. 1022-1028, 2010.
23. IYIM, T. B., ÖZGÜMÜS, S., ORBAY, M. – Blends and reaction products prepared from phenolic resin and waste PET. I. Mechanical properties. **Polymer-Plastics Technology and Engineering**, v.41 (5), p.917-931, 2002.
24. IYIM, T. B., ÖZGÜMÜS, S., ORBAY, M. – Blends and reaction products prepared from phenolic resin and waste PET. II. Thermal oxidative degradation. **Polymer-Plastics Technology and Engineering**, v.42 (1), p.17-32, 2003.

- 25.ERTAS, K., GÜÇLÜ, G. – Alkyd resins synthesized from glycolysis products of waste PET. **Polymer-Plastics Technology and Engineering**, v.44, p.783-794, 2005.
- 26.KALFOGLU, N., SKAFIDAS, D. S., KALLITSIS, J., LAMBERT, J. C., DER STAPPEN, L. V. – Comparison of compatibilizer effectiveness for PET/HDPE blends. **Polymer**, v.36 (23), p.4453-4462, 1995.
- 27.ÁVILA, A. F., DUARTE, M. V. – A mechanical analysis on recycled PET/HDPE composites. **Polymer Degradation and Stability**, v.80, p.373-382, 2003.
- 28.SANTOS, P., PEZZIN, S. H. – Mechanical properties of polypropylene reinforced with recycled-pet fibers. **Journal of Materials Processing Technology**, v.143-144, p.517-520, 2003.
- 29.ZDRAZILOVA, N., HAUSNEROVA, B., KITANO, T., SAHA, P. – Rheological behavior of PP/PET and modified PP/PET blends. II. Dynamical viscoelastic properties. **Polymer & Polymer Composites**, v.12 (5), p.433-448, 2004.
- 30.ZHANG, H., GUO, W., YU, Y., LI, B., WU, C. – Structure and properties of compatibilized recycled poly(ethylene terephthalate)/linear low density polyethylene blends. **European Polymer Journal**, v.43, p.3662-3670, 2007.
- 31.TORRES, N., ROBIN, J. J., BOUTEVIN, B. – Study of thermal and mechanical properties of virgin and recycled poly(ethylene terephthalate) before and after injection molding. **European Polymer Journal**, v.36, p.2075-2080, 2000.
- 32.BAXI, R. N., PATHAK, S. U., PESHWE, D. R. – Mechanical, thermal, and structural characterization of poly(ethylene terephthalate) and poly(butylene terephthalate) blend systems by the addition of postconsumer poly(ethylene terephthalate). **Journal of Applied Polymer Science**, v.115, p.928-934, 2010.
- 33.PEGORETTI, A.; KOLARIK, J.; PERONI, C.; MIGLIARESI, C. Recycled poly(ethylene terephthalate)/layered silicate nanocomposites: morphology and tensile mechanical properties. **Polymer**, v. 45, p. 2751-2759, 2004.
- 34.CLASSIFICAÇÃO das fibras têxteis. Documento em pdf. Disponível em: <<http://api.ning.com/files/>>. Acesso em: ago. 2010.
- 35.BNDS. Relato setorial fibras artificiais e sintéticas. Documento em pdf. Disponível em: www.bndes.gov.br. Acesso em: ago. 2010.
- 36.KELLER, P. F. Impactos da globalização econômica sobre a cadeia têxtil brasileira: o caso do pólo têxtil de Americana (SP). **Revista Universidade**

- Rural**, Série Ciências Humanas, Seropédica, RJ, EDUR, v. 28(1-2), p. 59-77, 2006.
37. PEREIRA, G. DE SOUZA. **Introdução à tecnologia têxtil**. Apostila do curso têxtil em malharia e confecção, módulo II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina. Unidade de ensino Aranguá, 2010.
38. RABELLO, M. **Aditivção de polímeros**. São Paulo: ArtLiber, 2000.
39. CORANTES: A Química nas Cores. **Revista eletrônica do Departamento de Química UFSC**. Acesso em: jan. 2011.
40. GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. dos. **Ensaio dos materiais**. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos S.A., 2000.
41. GUARATINI, C. C. I.; ZANONI, M. V. B. Corantes têxteis. **Química Nova**, v. 23(1), p.71-78, 2000.
42. PETERS, R. H. **Textile Chemistry**. v. 3, Elsevier, Amsterdam, 1975.
43. ABRHAM, E. N. **Dyes and Their Intermediates**. Edward Arnold, London, 1977.
44. EQUIPAMENTOS nacionais / perspirômetro. Disponível em: <<http://www.gaminetextile.com/equipamentos>>. Acesso em: jan. 2011.
45. ESTABILIZAÇÃO e degradação de polímeros. Documento eletrônico em formato pdf. Disponível em: <lpcr.iqm.unicamp.br/arquivos/j-fotoestabilizantes.pdf> Acesso em: jan. 2011.
46. WIKIPEDIA. Microscópio eletrônico de varredura. Documento eletrônico. Disponível em: <<http://www.wikipedia.org>>. Acesso em: fev. 2011.

ANEXO - Resultado dos testes feitos pelo Laboratório RIL/CETIQT

Titulação de fios têxteis

O sistema **decitex** (ou, abreviadamente, **dtex**), que corresponde à massa do fio em gramas para 10.000 m de fio [37]. Como se pode observar este sistema possui a massa (em gramas) por comprimento (em metro) de fio, diretamente proporcional à sua “espessura”, (ou seja, pode-se afirmar que quanto maior é a massa por comprimento de um fio, mais “espesso” ele é), e que por isto são conhecidos por 7 sistemas diretos de titulação, o que não significa que o título seja diretamente proporcional ao seu diâmetro [37].

Apesar dos sistemas **denier** e **dtex** serem os mais conhecidos, não são os únicos diretos. O **dtex** é um submúltiplo do sistema **tex** (1 grama por 1.000 metros) que, evidentemente, também é um sistema direto de titulação. Este sistema foi desenvolvido pelo *The Textile Institute* (em Manchester, Inglaterra), sendo divulgado em 1945, com a finalidade de ser utilizado como um sistema universal de titulação. Lamentavelmente ainda é pouco utilizado mundialmente, apesar da maior parte dos países terem criados normas nacionais considerando o sistema **tex** como oficial. Isto ocorre também no Brasil (norma Inmetro NBR 8427), porém apenas as empresas produtoras de fibras químicas adotaram plenamente o sistema (utilizando o **dtex** para a titulação de fibras contínuas e descontínuas) [37].

O **tex** é um sistema bastante simples de se trabalhar, admitindo submúltiplos como o **decitex** (ou **dtex**), cuja base é 1 grama por 10.000 metros, utilizado principalmente em filamentos, ou **militex** (ou **mtex**), correspondendo a 1 grama por 100.000 metros, utilizado na titulação de fibras individuais, admitindo também múltiplos, como o **quilotex** (ou **ktex**) que é utilizado na titulação de cabos que apresentam maior massa por metro. O **ktex** é o equivalente a 1 grama por metro [37].

Máquinas de malharia circular

São máquinas utilizadas para confeccionar tecidos de malha, em formato circular as agulhas recebem o fio de forma negativa e formam as malhas que é a estrutura do tecido. Essas máquinas podem ser de pequeno, médio e grande diâmetro, e também podem oferecer 3 tipos de tecimentos, são eles, monofrontura, dupla-frontura que pode ser cilindro-cilindro ou disco cilindro e ainda existe com dispositivo jacquard (fazer desenhos).

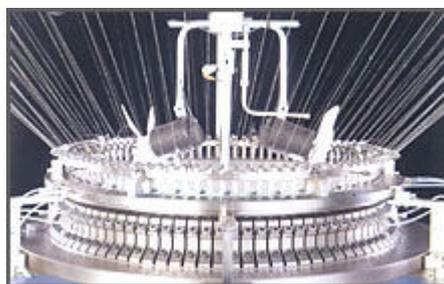


Fig. 20. Máquina circular de finura 32, utilizada no projeto.

- imagem retirada do site da ORIZIO,
http://www.orizio.com.br/monofrontura_JOHNC.html

Mecanismos de tingimentos têxteis

A forma de fixação da molécula do corante nas fibras têxteis é, geralmente, feita em solução aquosa e pode envolver basicamente quatro tipos de interações: ligações iônicas; ligações de hidrogênio; interações do tipo van der Waals; e, ligações covalentes [41].

As **interações iônicas** nos tingimentos são baseadas em interações mútuas entre o centro positivo dos grupos amino e carboxilatos presentes na fibra e a carga iônica da molécula do corante ou vice-versa. Exemplos característicos deste tipo de interação são encontrados na tintura da lã, seda e poliamida. Por outro lado, as **interações por hidrogênio** nas tinturas são provenientes das ligações entre átomos de hidrogênio, covalentemente ligados no corante, e pares de elétrons livres de átomos doadores, os quais estão dispostos em centros presentes nas fibras. Exemplos característicos deste tipo de interação são encontrados na tintura de lã, seda e fibras sintéticas como acetato de celulose [41-43].

As **interações covalentes** são provenientes da formação de uma ligação covalente entre a molécula do corante contendo grupos reativos (grupos eletrofílicos⁶) e resíduos nucleofílicos⁷ da fibra. Exemplos característicos deste tipo de interação são tinturas de fibra de algodão.

As **interações de van der Waals** nos tingimentos são baseadas na interação proveniente da aproximação máxima entre orbitais π do corante e da molécula da

⁶Um **eletrófilo** é um reativo químico atraído até zonas ricas em elétrons que participa em uma reação química aceitando um par de elétrons formando uma ligação com um nucleófilo. Já que os eletrófilos aceitam elétrons, eles são ácidos de Lewis. A maioria dos eletrófilos estão carregados positivamente, têm um átomo que leva uma carga positiva parcial ou ainda não possuem um octeto de elétrons. Os eletrófilos atacam a zona de maior densidade eletrônica do nucleófilo. Os eletrófilos encontrados frequentemente nos processos de síntese orgânica podem ser cátions (ex.: H^+ e NO^+), moléculas neutras polarizadas (ex.: cloreto de hidrogênio, haloalcanos, ácidos halógenos e grupos carbonilos), moléculas neutras polarizáveis (ex.: Cl_2 e Br_2), agentes oxidantes (ex.: peroxiácidos orgânicos), espécies químicas que não satisfazem a regra do octeto (ex.: carbenos e radicais livres), e alguns ácidos de Lewis (ex.: BH_3) [41-43].

⁷Espécie química que busca centros positivos em moléculas envolvidas numa reação química. Um nucleófilo é uma base de Lewis, ou seja, um potencial doador de par de elétrons [41-43].

fibra, de tal modo que as moléculas do corante são “ancoradas” firmemente sobre a fibra por um processo de afinidade, sem formar uma ligação propriamente dita. Esta atração é especialmente efetiva quando a molécula do corante é linear/longa e/ou achatada e pode assim se aproximar o máximo possível da molécula da fibra. Exemplos característicos deste tipo de interação são encontrados na tintura de lã e poliéster com corantes com alta afinidade por celulose [41-43].