

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E  
ENGENHARIA DE MATERIAIS

FERNANDO ROBERTO KLEIN

**ESTUDO DA DEGRADAÇÃO TÉRMOMECÂNICA E  
FOTOOXIDATIVA DE POLI(ÁCRILONITRILA-BUTADIENO-  
ESTIRENO) PARA FINS DE RECICLAGEM PRIMÁRIA**

Orientador: Guilherme M. O. Barra

FLORIANÓPOLIS, 2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E  
ENGENHARIA DE MATERIAIS

FERNANDO ROBERTO KLEIN

**ESTUDO DA DEGRADAÇÃO TÉRMOMECÂNICA E  
FOTOOXIDATIVA DE POLI(ACRILONITRILA-BUTADIENO-  
ESTIRENO) PARA FINS DE RECICLAGEM PRIMÁRIA**

Dissertação de Mestrado apresentada  
ao Programa de Pós-Graduação em  
Ciência e Engenharia de Materiais da  
Universidade Federal de Santa  
Catarina como parte dos requisitos  
para obtenção do título de Mestre em  
Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Guilherme M. O. Barra,  
Dr.

FLORIANÓPOLIS, 2009

FERNANDO ROBERTO KLEIN

**ESTUDO DA DEGRADAÇÃO TÉRMOMECÂNICA E  
FOTOOXIDATIVA DE POLI(ACRILONITRILA-BUTADIENO-  
ESTIRENO) PARA FINS DE RECICLAGEM PRIMÁRIA**

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais e aprovado em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina.

---

Prof. Dr. Guilherme Mariz de Oliveira Barra

---

Prof. Dr. Carlos Augusto Silva de Oliveira

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Gean Vitor Salmoria  
Presidente

---

Prof. Dr. Daniela Becker

---

Prof. Dr. Cláudia Sayer

## Ficha Catalográfica

KLEIN, Fernando. 1983.

Estudo da degradação termomecânica e fotooxidativa de poli(acrilonitrila-butadieno-estireno) para fins de reciclagem primária. Florianópolis, UFSC, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, 2008.

Dissertação: Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais

Orientador: Guilherme Marinz de Oliveira Barra, Dr.

1. Degradação 2. ABS 3. Propriedades Mecânicas e espectroscópicas.

I. Universidade Federal de Santa Catarina

II. Título

## AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a Deus por prover este momento único em minha vida, por abrir os caminhos do conhecimento e possibilitar a conclusão de mais esta etapa. Agradeço em especial a minha família Andréia Hildinger Klein e Vitor Augusto Klein por me suportarem nessa jornada que só poderia superá-la com o apoio deles. Além deles, gostaria de agradecer aos meus pais pelo carinho e pela torcida da conclusão deste programa.

Agradeço especialmente ao meu orientador Guilherme Barra (Guiga), que deu seu apoio incondicional, agindo como um grande mestre e amigo. Agradeço ainda aos amigos como a Palova Santos Balzer que esperou este momento com grande expectativa.

Também quero agradecer aos que me suportaram, criticando e agregando cada vez mais valor a este trabalho, pessoas como a Daniela Becker, Rogério Araújo, Marcos Teixeira, Edson Cardoso, Mário Godinho entre muitos outros.

Todo este trabalho ainda não poderia estar tão enriquecido sem a ajuda dos laboratórios do CIMJECT da UFSC, Laboratório Físico-Químico e demais dependências da Whirlpool e a SOCIESC que permitiram a execução dos ensaios e trabalhos realizados nesta dissertação.

A todos o meu muito obrigado!  
Joinville, 16 de março de 2009.

## SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....	viii
LISTA DE TABELAS .....	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	xi
RESUMO .....	xii
ABSTRACT .....	xiii
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1. OBJETIVO GERAL.....	3
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1. DEGRADAÇÃO DOS MATERIAIS POLIMÉRICOS .....	4
3.1.1 Fotooxidação .....	5
3.1.2. Termooxidação.....	6
3.2. POLÍMERO: ACRILONITRILA BUTADIENO ESTIRENO (ABS) .....	7
3.2.1. Degradação do ABS .....	8
3.3 SISTEMAS DE ENVELHECIMENTO .....	9
3.3.1 Envelhecimento por intemperismo natural.....	9
3.3.2 Envelhecimento fotoquímico artificial.....	10
3.3.3 Envelhecimento Térmico .....	13
4. TÉCNICAS DE ACOMPANHAMENTO DA DEGRADAÇÃO..	14
4.1 ENSAIOS MECÂNICOS.....	14
4.1.1 Ensaio de resistência a Tração.....	15
4.1.2 Ensaio de resistência ao Impacto.....	15
4.2 ANÁLISE TÉRMICA .....	15
4.2.1 Análise Dinâmico-Mecânica (DMA) .....	16
4.2.1.1 Técnicas de ensaio do DMA.....	18
4.3. ENSAIOS ESPECTROSCÓPICOS .....	19
4.3.1 Espectrometria de Infravermelho .....	19
4.4. ÍNDICE DE AMARELECIMENTO.....	20
5. MATERIAIS E MÉTODOS .....	22
5.1 METODOLOGIA .....	22
5.2 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA POR INJEÇÃO.....	23
5.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA ENVELHECIMENTO TÉRMICO .....	24
5.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA ENVELHECIMENTO POR ATAQUE UV .....	27
5.5 CARACTERIZAÇÃO.....	28

5.5.1 ESPECTROMETRIA DE INFRAVERMELHO .....	28
5.5.2 ENSAIO DINÂMICO-MECÂNICO (DMA) .....	29
5.5.3 COLORIMETRIA .....	29
5.5.4 ENSAIOS MECÂNICOS.....	30
5.5.4.a Ensaio de Resistência a Tração.....	31
5.5.4.b Ensaio de Resistência ao impacto.....	31
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	32
6.1 Espectrometria de Infravermelho .....	32
6.2. Ensaio dinâmico-mecânico (DMA).....	36
6.3 COLORIMETRIA.....	41
6.4. Ensaio de Resistência a Tração .....	43
6.5 Ensaio de Resistência ao impacto.....	47
CONCLUSÃO .....	50
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	52
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	53
ANEXO I .....	55

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1: SURGIMENTO DE: A) RAMIFICAÇÃO, B) RETICULAÇÃO.....	5
FIGURA 2: ESTRUTURA QUÍMICA DO TERPOLÍMERO DE ABS <sup>[6]</sup> .....	7
FIGURA 3: ENERGIA SOLAR DISTRIBUÍDA NO MAPA GLOBAL <sup>[5]</sup> .....	10
FIGURA 4: ESQUEMA DE FOTODEGRADAÇÃO DE UMA LIGAÇÃO DUPLA.....	11
FIGURA 5: COMPARAÇÃO DOS ESPECTROS DE ONDA: A) LÂMPADA UV-A NÃO FILTRADA, B) UV-A FILTRADA COM VIDRO E, C) LUZ SOLAR FILTRADA COM VIDRO <sup>[21]</sup> ....	12
FIGURA 6: COMPARAÇÃO DOS ESPECTROS DE ONDA: A) LÂMPADA UV-B NÃO FILTRADA, B) UV-B FILTRADA COM VIDRO E, C) LUZ SOLAR FILTRADA COM VIDRO <sup>[21]</sup> ....	12
FIGURA 7: RESPOSTAS DE DIFERENTES MATERIAIS A UMA TENSÃO APLICADA.....	17
FIGURA 8: MODOS DE SOLICITAÇÃO MECÂNICA NO ENSAIO DE DMA.....	19
FIGURA 9: FLUXOGRAMA PARA FABRICAÇÃO E ENSAIOS ENVOLVIDOS.....	22
FIGURA 10: INJETORA SANDRETTO 50.....	23
FIGURA 11: MOLDE ISO COM CAVIDADE DE CORPO DE PROVA DE IMPACTO (A), MOLDES ISO DE TRAÇÃO (B) E COR (C).....	23
FIGURA 12: ETAPAS E OPERAÇÕES PARA FABRICAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	25
FIGURA 13: CÂMARA DE ENVELHECIMENTO SOLARBOX MODELO 1500.....	28
FIGURA 14: COLORÍMETRO GRETAG MACBETH MODELO COLOR EYE 3100.....	30
FIGURA 15: ESPECTRO DE FTIR DA AMOSTRA 1 SEM ATAQUE UV.....	32
FIGURA 16: ESPECTROS DE INFRAVERMELHO DE: A) AMOSTRA 1 NÃO ENVELHECIDA (REFERÊNCIA) E AMOSTRAS B) 2C, C) 3C E D) 4C COM ATAQUE UV, RESPECTIVAMENTE.....	34
FIGURA 17: ESPECTROS DE FTIR DA (A) AMOSTRA 1; E AMOSTRAS ENVELHECIDAS POR ATAQUE UV PICOS DE	

A) 911CM <sup>-1</sup> E B)966CM <sup>-1</sup> DE DIFERENTES AMOSTRAS ENVELHECIDAS.: B) 2C; 3C E 4C, RESPECTIVAMENTE. ....	35
FIGURA 18: CORRELAÇÃO ENTRE PICOS DE 966/2250 E 911/2250 DAS AMOSTRAS 1, 2C, 3C E 4C.....	36
FIGURA 19: CURVAS DO LOG MÓDULO DE ARMAZENAMENTO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA A AMOSTRA 1 E DIFERENTES MISTURAS DE ABS VIRGEM/MATERIAL RECICLADO NA PROPORÇÃO DE 90/10(M/M).....	37
FIGURA 20: CURVAS DO LOG MÓDULO DE PERDA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA A AMOSTRA 1 E DIFERENTES MISTURAS DE ABS VIRGEM/MATERIAL RECICLADO NA PROPORÇÃO DE 90/10 (M/M). ....	38
FIGURA 21: CURVAS DE LOG (E''/E') EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA CORPOS-DE-PROVA ENVELHECIDOS TERMICAMENTE E UV (AMOSTRAS REPROCESSADAS 2B, 3B, 4B E PROCESSADA UMA VEZ (AMOSTRA 1)). ....	39
FIGURA 22: CURVAS DE TANGENTE DE PERDA (E''/E') EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA MISTURAS DE ABS VIRGEM/ABS ENVELHECIDO TERMICAMENTE EM CONCENTRAÇÕES DE: A) 90/10 (M/M) E B) 80/20 (M/M). A AMOSTRA 1 É A AMOSTRA DE ABS NÃO ENVELHECIDA....	40
FIGURA 23: EVOLUÇÃO DE ENVELHECIMENTO DA AMOSTRA 1 DE ABS. ....	42
FIGURA 24: ÍNDICE DE AMARELECIMENTO DAS AMOSTRAS DE ABS COM INCORPORAÇÃO DE MATERIAL REPROCESSADO.....	43
FIGURA 25: RESULTADO DE DEFORMAÇÃO NA RUPTURA PARA TESTE DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO. ....	44
FIGURA 26: RESULTADO DE TENSÃO DE RUPTURA PARA TESTE DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO. ....	45
FIGURA 27: DESVIO PADRÃO DA CURVA DE ALONGAMENTO TOTAL SEM ATAQUE UV.....	46
FIGURA 28: EVOLUÇÃO DO MÓDULO DE TENSÃO PARA AS DIFERENTES AMOSTRAS. ....	47
FIGURA 29: TABELA DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO.....	47
FIGURA 30: DESVIO PADRÃO PARA O ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO.....	49

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1: RESISTÊNCIA À DEGRADAÇÃO POR VÁRIOS AMBIENTES PARA MATERIAIS PLÁSTICOS SELECIONADOS <sup>[11]</sup> .....	4
TABELA 2: PARÂMETROS UTILIZADOS PARA FABRICAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA ATRAVÉS DA MOLDAGEM POR INJEÇÃO.....	24
TABELA 3: PLANO DE TESTES PARA FABRICAÇÃO DE AMOSTRAS.....	26
TABELA 4: PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO AJUSTADOS.....	27
TABELA 5: PRINCIPAIS BANDAS DE ABSORÇÃO DO ESPECTRO DE INFRAVERMELHO DO ABS.....	33
TABELA 6: TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO VÍTREA E FATOR DE AMORTECIMENTO PARA O ABS E MISTURAS DE ABS VIRGEM/ABS ENVELHECIDO TERMICAMENTE.....	41

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**ABS:** terpolímero de acrilonitrila butadieno estireno

**SAN:** copolímero de acrilonitrila estireno

**Amostra 1:** ABS processado para a fabricação de corpos de prova a partir da resina virgem.

**2A:** mistura de 95% de massa ABS virgem e 5% de massa de ABS reprocessado a partir da moagem das peças moldadas para fabricação da Amostra 1.

**2B:** mistura de 90% de massa ABS virgem e 10% de massa de ABS reprocessado a partir da moagem das peças moldadas para fabricação da Amostra 1.

**2C:** mistura de 80% de massa ABS virgem e 20% de massa de ABS reprocessado a partir da moagem das peças moldadas para fabricação da Amostra 1.

**3A:** mistura de 95% de massa ABS virgem e 5% de massa de ABS reprocessado a partir da moagem das peças moldadas para fabricação da Amostra 2A.

**3B:** mistura de 90% de massa ABS virgem e 10% de massa de ABS reprocessado a partir da moagem das peças moldadas para fabricação da Amostra 2B.

**3C:** mistura de 80% de massa ABS virgem e 20% de massa de ABS reprocessado a partir da moagem das peças moldadas para fabricação da Amostra 2C.

**4A:** mistura de 95% de massa ABS virgem e 5% de massa de ABS reprocessado a partir da moagem das peças moldadas para fabricação da Amostra 3A.

**4B:** mistura de 90% de massa ABS virgem e 10% de massa de ABS reprocessado a partir da moagem das peças moldadas para fabricação da Amostra 3B.

**4C:** mistura de 80% de massa ABS virgem e 20% de massa de ABS reprocessado a partir da moagem das peças moldadas para fabricação da Amostra 3C.

**DMA:** Análise Dinâmico-Mecânica

**TMA:** Análise Termomecânica

**DSC:** Calorimetria Diferencial de Varredura

**IR:** Espectroscopia de Infravermelho

**FTIR:** Análise de Infravermelho por Transformada de Fourier

**Tg:** Temperatura de Transição Vítea

**Tm:** Temperatura de fusão cristalina

## RESUMO

O interesse da reciclagem primária do copolímero de acrilonitrila, butadieno estireno (ABS) é crescente, principalmente para a indústria automobilística e de eletrodomésticos que utilizam muito este material. Um dos problemas encontrados no re-processamento do ABS é a sua susceptibilidade a alterações estruturais devido à degradação térmica ou fotooxidativa. Normalmente, esses processos de degradação resultam na diminuição das propriedades mecânicas e mudança de propriedades óticas (principalmente amarelamento). Desta maneira, o conhecimento do processo de degradação do ABS e as modificações de propriedades físicas e químicas tornam-se importantes para avaliar a possibilidade de reciclagem deste material em aplicações sem a depreciação de custo do produto fabricado. Neste trabalho foi avaliada a degradação do ABS após envelhecimento térmico e fotooxidativo. A condição de envelhecimento foi escolhida com o intuito de simular a degradação que esse polímero é submetido durante seu ciclo de vida como materiais utilizados na indústria automobilística e de eletrodomésticos. As mudanças das propriedades físicas do ABS envelhecido e não envelhecido foram observadas a partir dos ensaios mecânicos de tração, impacto, análise dinâmico-mecânica (DMA) e pelo índice de amarelecimento. A Espectrometria no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) foi utilizada para verificar o aparecimento de bandas características do processo de degradação desse polímero. Os resultados mostraram que há redução das propriedades mecânicas e amarelecimento do ABS após o envelhecimento térmico e/ou fotooxidativo. Entretanto, pôde-se concluir que, apesar de constatado o envelhecimento no material quando reprocessado e/ou submetido ao envelhecimento fotooxidativo, esta redução pode não ser tão significativa, possibilitando a reutilização do material para a fabricação de peças técnicas de menor valor agregado; e que as misturas de ABS envelhecido/matéria-prima virgem, nas proporções estudadas, podem apresentar um desempenho similar ao ABS não reciclado.

## ABSTRACT

The interest regarding the primary recycling for Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) is rising, mainly for vehicle and home appliances industry that have large scale consumption for this material. One of the main problems faced on ABS reprocessing is its susceptibility to structural changes due thermal and photo oxidative degradation. Normally, these degradation processes results in the mechanical properties decrease and optical properties changes (mainly yellowing). The acknowledgement of the ABS degradation process and the physical and chemical properties changes become important to evaluate the feasibility of recycling this material in applications without cost depreciation of manufactured products. In this study it was evaluated the ABS degradation after thermal and photo oxidative aging. The aging condition was chosen looking for simulate the degradation that this polymer is submitted during its lifetime as used materials in automobilist and home appliances manufacturers. The changed physical properties of aged and not aged ABS were investigated by techniques as mechanical tests of Tensile and Impact Strengths, Dynamical-Mechanic Analysis (DMA) and Cromatography as yellowing index. The Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) was used to evaluate the aging process that inflicts in new characteristic bands. The results drove to the understanding that there is mechanical properties reduction so as the yellowing evolution for the ABS after thermal and/or photooxidative aging. Despite that, it was possible to conclude that even after acknowledged the material aging when reprocessed and/or submitted to the photooxidative aging, the reduction may not be so significant, making possible the material reallocation to the manufacturing of technical parts with lower added value, and that the ABS mixtures aged/raw material, in studied proportions, may deliver a similar performance as none recycled ABS.

# 1. INTRODUÇÃO

Segundo informações<sup>[1]</sup>, o Brasil gera em torno de 240 mil toneladas por dia de lixo, onde os polímeros ocupam uma fatia de 15 a 20% em volume dos resíduos gerados<sup>[2]</sup>, aumentando a poluição e a dificuldade de reaproveitamento do material descartado. O impacto ambiental gerado pelo acúmulo de polímeros em aterros e lixões é elevado, uma vez que esses materiais dificultam a compactação dos resíduos sólidos e levam muito tempo para se degradar<sup>[3]</sup>. A preocupação com esse problema na era da conscientização ambiental tem direcionado a comunidade científica e tecnológica para o desenvolvimento de processos e métodos, como a reciclagem de resíduos e tratamentos de efluentes, para aproveitar de uma maneira mais conveniente os recursos naturais e poluir cada vez menos.

A reciclagem de polímeros vem sendo empregada em diversos setores tecnológicos com o objetivo de re-introduzir o material polimérico no processo produtivo, transformando-o em um produto de menor valor agregado ou destinado a uma mesma aplicação. A reciclagem de polímeros pode ser classificada em três tipos: primária, secundária e terciária<sup>[4]</sup>. A reciclagem primária é aquela feita antes que o produto chegue ao consumidor, podendo ser realizada pela própria indústria de transformação de polímeros ou empresa terceirizada. O material a ser reciclado é proveniente do corte das rebarbas de peças, aparas dos moldes, peças defeituosas, entre outros. Os resíduos destinados a esta recuperação geralmente são termoplásticos que são reciclados para minimizar a quantidade de descartes industriais que tem como principal intuito reduzir custos. Entretanto, em muitos casos a utilização de polímero reciclado, também denominado neste trabalho de material reprocessado, é limitada frente a aplicações em que são exigidas excelentes propriedades mecânicas, térmicas, entre outras. Isto geralmente ocorre porque estes materiais sofrem determinados processos de degradação, devido ao re-processamento ou após sua estocagem, o que pode resultar em produtos que não atinjam as mesmas propriedades dos materiais fabricados a partir da matéria-prima não reciclada. Para contornar este problema, pode-se misturar a matéria-virgem com o material reprocessado, prática muito comum utilizada nas indústrias de transformação de termoplásticos.

Dentre os polímeros de engenharia o copolímero poli(acrilonitrila-butadieno-estireno) (ABS) é um dos materiais mais utilizados na indústria<sup>[5-6]</sup> por ter um custo acessível oferecendo ótimas propriedades físicas e químicas e de fácil processabilidade. Pesquisas

voltadas à incorporação de aditivos para modificação deste material potencializam a possibilidade de aplicá-lo em novos ramos como peças que exigem extrema resistência a inflamabilidade, alta resistência ao amarelamento no caso de peças estéticas, alta resistência ao impacto, entre outras<sup>[7-8]</sup>. A aplicação deste material vem crescendo de acordo com o desenvolvimento de pesquisas, sendo frequentemente utilizado em vários setores industriais como a indústria automobilística, eletrodomésticos, aeroespacial, entre outros.

O interesse na reciclagem primária do ABS é crescente, principalmente para a indústria automobilística e de eletrodomésticos que utilizam muito este material. Um dos problemas encontrado no reprocessamento do ABS é o fato de que este material pode sofrer alterações em sua estrutura devido à degradação térmica ou fotooxidativa. Normalmente, esses processos de degradação do ABS resultam na diminuição das propriedades mecânicas e mudança de propriedades óticas (amarelamento). Desta maneira, o conhecimento do processo de degradação do ABS e as alterações de propriedades mecânicas e óticas tornam-se importantes para avaliar a possibilidade da reciclagem desse material em aplicações sem a redução de custo do produto fabricado.

Para as empresas fabricantes de eletrodomésticos há uma restrição quanto à utilização de ABS refugado para a fabricação de peças de aplicação técnica de maior valor agregado devido à falta de dados técnicos e simulações das condições de uso na aplicação dos eletrodomésticos por ela fabricada. Embora a degradação do ABS venha sendo muito investigada em pesquisas<sup>[12-17]</sup>, existem alguns aspectos que podem ser mais explorados, como por exemplo, a relação entre a extensão da degradação e as propriedades macroscópicas e microscópicas, frente a fontes de luz artificial e tempo de residência do material para a sua reaplicação. Muitas pesquisas estão voltadas para as condições de aplicação para a indústria automobilística e os ensaios de degradação são normalmente conduzidos em condições muito diferentes das condições normais de uso. Baseado nesses fatores este trabalho tem como objetivo avaliar os processos de degradação<sup>[9-11]</sup> e sua relação com as possíveis mudanças nas propriedades mecânicas e óticas do ABS reciclado industrialmente, comparando com as amostras de ABS não reciclado.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

- Avaliar a degradação térmica e fotooxidativa do poli (acrilonitrila-butadieno-estireno) (ABS) e estudar a viabilidade da sua reciclagem primária.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Submeter amostras de ABS, confeccionadas por injeção, a ensaios de envelhecimento térmico e fotooxidativo e caracterizá-los por: I) Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), II) Análise Dinâmico-Mecânica (DMA), III) Colorimetria, IV) Ensaio de tração e VI) Ensaio de impacto.
- Relacionar a extensão da degradação térmica e fotooxidativa das amostras de ABS com as propriedades mecânicas e óticas.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. DEGRADAÇÃO DOS MATERIAIS POLIMÉRICOS

Existem várias definições para a questão de degradação dos materiais, entretanto podemos entender este fato como toda e qualquer reação química ou física que altere as propriedades do polímero<sup>[8]</sup>. Estas degradações podem ocorrer durante o seu processamento, estocagem, aplicação ou, preferencialmente no descarte do material. Tais reações podem significar quebra de ligações, normalmente por calor, pressão ou luz (artificial ou natural), facilitados pelo inchamento ou dissolução pela presença de solventes com polaridade semelhante, como podemos observar na Tabela 1.

**Tabela 1: Resistência à degradação por vários ambientes para materiais plásticos selecionados<sup>[11]</sup>.**

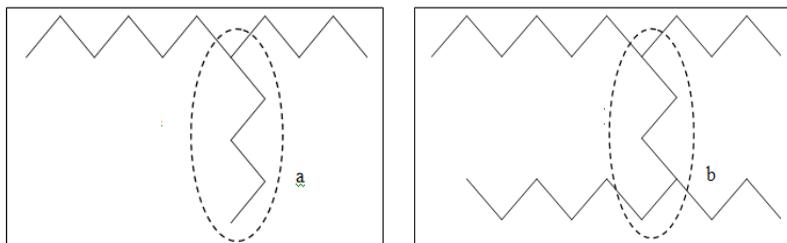
Material	Ácidos não-oxidantes (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 20%)	Ácidos oxidantes (HNO <sub>3</sub> , 10%)	Álcalis Aquosos (NaOH)	Solventes Polares (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH)	Solventes apolares (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )
Politetrafluoretileno	S	S	S	S	S
Náilon 6,6	I	I	S	Q	S
Polycarbonato	Q	I	I	S	I
Poliéster	Q	Q	Q	Q	I
Polietileno de baixa densidade	S	Q	--	S	Q
Polietileno de alta densidade	S	Q	--	S	Q
Polietileno tereftalato	S	Q	S	S	S
Polipropileno	S	Q	S	S	Q
Poliestireno	S	Q	S	S	I
Poliuretano	Q	I	Q	I	Q
Epóxi	S	I	S	S	S
Silicone	Q	I	S	S	Q

S = satisfatório; Q = questionável; I = insatisfatório.

A presença de luz, por exemplo, pode interagir com a energia eletrônica dos átomos constituintes do polímero causando algumas reações de degradação, como a de ionização, onde a reação remove um elétron do orbital de um átomo específico, convertendo esse átomo a um

ion positivamente carregado, podendo gerar quebra de ligações covalentes ou ainda a infiltração de átomos altamente eletronegativos, como o Oxigênio, por exemplo.

O surgimento desses radicais livres resulta na geração de novas ligações no polímero ou na formação de sub-componentes que alteram as propriedades físico-químicas do material. Comumente as novas ligações supracitadas são identificadas na formação de ramificações, reticulações e os sub-compostos são formados por grupos peróxi, hidroperoxi, álcoois ou mesmo água, conforme ilustrado na Figura 1.



**Figura 1: Surgimento de: a) ramificação, b) reticulação.**

Um fato característico da oxidação dos materiais poliméricos é o seu amarelamento. Normalmente esse fenômeno pode ser atribuído à presença de componentes *cromóforos*, que geralmente podem ser compostos por hidroperóxidos (ROOH) ou carbonilas ( $\bullet$ CO) resultantes do processo de polimerização ou ainda da degradação de aditivos como pigmentos, cargas, lubrificantes ou plastificantes. Estes agentes cromóforos atuam como catalisadores no processo de degradação dos polímeros<sup>[9]</sup>.

### 3.1.1 Fotooxidação

A fotooxidação é um processo de degradação muito comum para as mais diversas aplicações de peças plásticas, sejam elas afetadas pela luz solar (natural) ou por lâmpadas incandescentes ou fluorescentes (luz artificial), onde ambas podem afetar diretamente as propriedades dos materiais poliméricos. De acordo com Rabello, 2000: “Uma das principais fontes causadoras de degradação de polímeros é a radiação ultravioleta (comprimento de onda entre 100 e 400 nm) que corresponde a 5% da radiação solar”<sup>[9]</sup>.

Estudos mostram que este mecanismo de degradação é principalmente responsável pelo amarelecimento do material, porém, não se tem uma visão clara de qual a relevância desse mecanismo de degradação perante a aplicação final do material polimérico e, principalmente, quando comparado com o mecanismo de degradação termomecânica.

### **3.1.2. Termooxidação**

A termooxidação pode ocorrer quando o material polimérico é submetido a uma temperatura elevada na presença de oxigênio atmosférico ou outros elementos oxidantes. Semelhantemente a fotooxidação, compostos insaturados, com ramificação (presença de carbono alílico) e presença de grupos ou elementos fortemente eletronegativos geram ligações fracas na macromolécula, facilitando a iniciação da degradação.

Os polímeros podem iniciar o processo de termooxidação durante o seu processamento. Temperatura de processamento acima da recomendada pelo fabricante, falta de antioxidantes primários ou secundários ou elevada taxa de cisalhamento, pode gerar energia suficiente para dar início ao processo de oxidação, geralmente iniciado nos compostos de menor energia de ligação (ligações duplas e Carbonos alílicos, por exemplo). Essa cisão pode ser da macromolécula ou ainda dos aditivos presentes no polímero, formando radicais peróxi e ainda hidroperóxidos, fortes catalisadores que agravam ainda mais o processo de oxidação do polímero. Tal reação autocatalítica pode reduzir o peso molecular médio, influenciando diretamente as propriedades físicas do material, diminuindo significativamente a vida útil do material afetado.

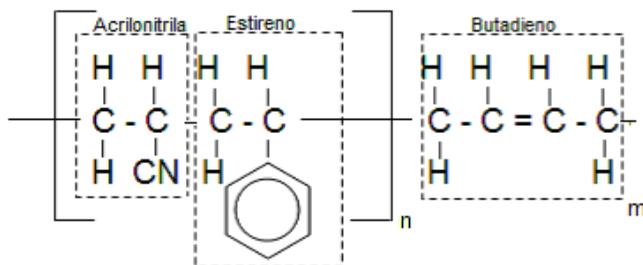
Uma pequena diferença do processo de termooxidação para o processo de fotooxidação é a iniciação, já que a quebra das ligações é gerada pela excitação dos átomos por absorção dos fótons gerados por uma fonte de luz. Um ponto importante a ser mencionado é que cada polímero responde de forma diferente a cada comprimento de onda, já que suas estruturas químicas possuem diferentes tipos de ligações químicas que envolvem diferentes forças de ligação.

Assim como a fotooxidação, a degradação termomecânica possui muitos estudos que buscam um melhor entendimento deste fenômeno, mas dificilmente encontra-se estudos que o correlacionam com a fotooxidação.

### 3.2. POLÍMERO: ACRILONITRILA BUTADIENO ESTIRENO (ABS)

Apresentado inicialmente na década de 50<sup>[6]</sup> como um derivado do Poliestireno através da incorporação do polibutadieno como uma blenda polimérica, por ter inicialmente estes polímeros misturados mecanicamente os copolímeros estireno-acrilonitrila (SAN). O polibutadieno possui como características principais à baixa temperatura de transição vítrea, boa dispersão e adesão interfacial na fase de SAN.

O ABS pode ser obtido a partir da incorporação do polibutadieno no processo de copolimerização do estireno e acrilonitrila; e sua propriedade varia de acordo com o percentual dos monômeros utilizados na síntese. O ABS obtido por este método é constituído por partículas de polibutadieno distribuídas em uma matriz de SAN. A estrutura química da unidade de repetição está apresentada na Figura 2. A fase de SAN é considerada como a fase rígida e frágil, oferecendo ao polímero boa resistência química, alta temperatura de distorção térmica, facilidade de processamento e excelente acabamento superficial, enquanto que a fase elastomérica aumenta a tenacidade do mesmo. Tipicamente, o terpolímero é constituído proporcionalmente de 70 partes de SAN (70:30 de estireno-acrilonitrila) e 30 partes de borracha (63:35 de butadieno-acrilonitrila).



**Figura 2: Estrutura química do terpolímero de ABS<sup>[6]</sup>.**

O ABS apresenta excelente combinação de propriedades, por isso é um material comercialmente interessante para vários campos de aplicação, como por exemplo: nas indústrias automobilística, eletrodomésticos, em embalagens de alimentos, em itens de segurança e estéticos, devido a sua boa interação interfacial, permitindo diversos tipos de pintura e metalização, e embalagens de alimentos.

### 3.2.1. Degradação do ABS

Devido a susceptibilidade a degradação termo-oxidativa e fotooxidativa das duplas ligações presentes na cadeia do componente de polibutadieno, o ABS apresenta baixa resistência ao envelhecimento natural sob radiação solar (e/ou temperaturas elevadas de trabalho), representada pela formação de uma camada superficial de material altamente fragilizado (profundidade da camada crítica 10-15  $\mu\text{m}$ ), que resulta numa queda drástica da resistência ao impacto e tenacidade do ABS<sup>[7]</sup>.

Geralmente a fase mais suscetível à degradação é a elastomérica (polibutadieno), sendo facilmente constatado com a queda de resistência ao impacto e aumento do módulo de elasticidade, indicando que o polímero está perdendo sua elasticidade. Isto acontece devido à formação de ramificações ou reticulações da borracha, o que reduz sua mobilidade molecular. A substituição do polibutadieno por um outro elastômero menos susceptível a estes tipos de degradação poderia reduzir este problema.

As propriedades do ABS são dependentes da quantidade dos três compostos utilizados no processo de polimerização. O ABS é um material comercialmente interessante para vários campos de aplicação, uma vez que suas propriedades podem ser ajustadas a partir da incorporação de diferentes aditivos ou ainda alterando-se as quantidades de cada comonômero presente no polímero (aumento da quantidade de polibutadieno, por exemplo, para aumentar a resistência ao impacto). Para aplicações mais nobres, aditivos podem ser incorporados ao polímero a fim de retardar as reações de degradação para que suas propriedades possam perdurar durante a vida útil da peça aplicada.

Estudos<sup>[21]</sup> mostram que, tão crítica quanto à quantidade de polibutadieno utilizado, é a sua qualidade. Os isômeros têm comportamentos e dinâmicas diversas quando submetidos à degradação. Uma vez iniciada esta serve de catalisador para a iniciação da degradação para demais isômeros ou ainda para as outras fases deste terpolímero<sup>[13]</sup>.

Para a constatação da sua degradação, pesquisas utilizam diferentes técnicas que permitem sua visualização, entretanto, comumente utiliza principalmente técnicas espectroscópicas como FTIR e térmicas como a Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC), já que se procura basicamente alguma alteração atrelada a fase elastomérica<sup>[15]</sup>.

Mas, apesar de diversos estudos para ter-se um melhor entendimento da evolução da degradação térmica, mecânica e

fotooxidativa<sup>[13-22]</sup>, não é encontrado nas literaturas que correlacionam estes mecanismos de degradação de forma conjunta, o que poderia indicar de maneira mais clara a escala de relevância de cada mecanismo quando comparados entre si. Este tipo de entendimento remete a uma visão mais clara de qual mecanismo tem maior influência na degradação de um material polimérico especificamente.

### 3.3 SISTEMAS DE ENVELHECIMENTO

Em muitos casos de pesquisa é necessário entender o comportamento do material polimérico em condição de aplicação para poder determinar seu desempenho ao longo de sua vida útil. Visando esta necessidade foram criados diferentes métodos de envelhecimento que padronizam, medem e informam, muitas vezes de forma acelerada, uma maneira que possa ter representatividade e repetibilidade das condições de aplicação dos materiais. Estes ensaios podem ser feitos em estações de exposição (envelhecimento ambiental) ou em laboratório (envelhecimento acelerado). A partir desses métodos de envelhecimento pode-se determinar, em um tempo reduzido, a vida útil de um material qualquer para determinada exposição, informando se o material escolhido é adequado para tal aplicação.

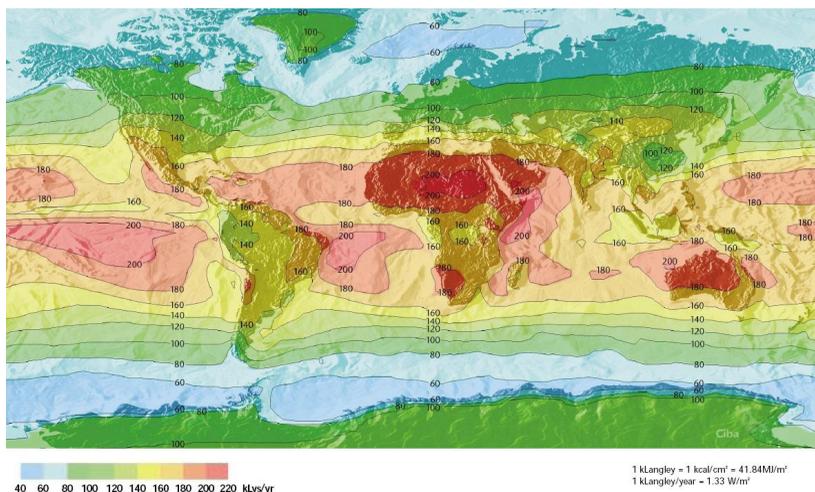
Os ensaios de envelhecimento ambiental devem simular as condições de uso do material a ser ensaiado. Neste método, o material fica exposto a ciclos de claro e escuro, variações cíclicas de temperatura e outros efeitos. No caso de envelhecimento acelerado, os fatores que causam a degradação podem ser simulados isoladamente ou em conjunto, de forma controlada.

#### 3.3.1 Envelhecimento por intemperismo natural

O sistema de envelhecimento por intemperismo natural submete às mais variadas condições de degradação naturalmente presentes na aplicação do material. Estas variam entre a incidência solar, chuva, frio, poluição, umidade entre muitos outros.

Para este tipo de ensaio, é muito importante o registro das variações climáticas as quais o corpo-de-prova foi submetido. Outro ponto importante é avaliar as condições climáticas do local onde se pretende realizar o experimento. Condições extremas, como o calor e falta de umidade dos desertos, ou umidade extrema como cidades tropicais acabam impossibilitando a repetibilidade do experimento e

consecutivamente a representatividade, a menos que o material tenha uma aplicação restrita ou específica. A Figura 3 mostra as diferentes quantidades de energia solar distribuída no mapa global. Pode-se citar como ponto negativo deste tipo de sistema o tempo de resposta, que, dependendo da necessidade, pode durar meses até anos para a conclusão, já que não pode ser considerado como um ensaio de envelhecimento acelerado<sup>[13,15,18]</sup>.



**Figura 3: Energia solar distribuída no mapa global<sup>[5]</sup>.**

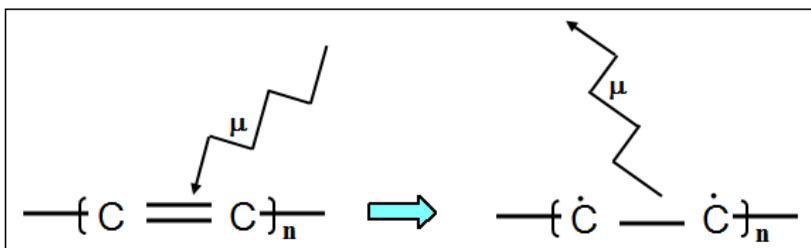
Há diversas normas que procuram sistematizar esse tipo de ensaio referenciando pontos cruciais como tipo de acondicionamento, local onde o corpo de prova ficará exposto, necessidade de circulação de ar entre as amostras, buscando proporcionar a repetibilidade do ensaio quando necessário.

### 3.3.2 Envelhecimento fotoquímico artificial

O envelhecimento fotoquímico artificial consiste em realizar a degradação do material de forma acelerada possibilitando obter respostas de degradação térmica e fotoquímica ao material em tempo reduzido. A fonte de luz, artificialmente produzida, pode simular diferentes tipos de incidência solar, sendo esta direta ou indireta ou ainda filtrada por outros materiais, normalmente simulando a presença

de um vidro entre a amostra e a luz solar. Juntamente ao ataque fotoquímico, a temperatura ambiente também pode ser maior para que se permita acelerar a cinética de degradação do material em questão.

Sabe-se que a incidência de luz solar tem grande participação no aumento da cinética de degradação de polímeros conforme é mostrado no esquema expressado na Figura 4. O fóton fornece energia ao átomo levando-o a um estado de excitação eletrônica que ao liberá-lo, pode dar início à quebra de ligações de menor energia (átomos alílicos, ligações secundárias, terciárias, etc).



**Figura 4: Esquema de fotodegradação de uma ligação dupla.**

Conhecidamente, o Sol emite um amplo espectro de luz onde especificamente a gama de menores comprimentos de onda são os maiores responsáveis pela degradação dos materiais poliméricos. As radiações UV-A (comprimento de onda de 400 a 315 nm) e UV-B (315 a 280 nm) são especialmente agressivas por possuírem tais comprimentos de onda. Os raios UV-C (abaixo de 280 nm) possuem um comprimento que normalmente não iniciam o processo de degradação para materiais poliméricos.

Porém, conforme comentado anteriormente, o ensaio de envelhecimento artificial acelerado pode simular diferentes tipos de exposições do material a luz natural ou artificial. Dependendo do tipo de aplicação escolhe-se o mais apropriado para que a simulação tenha representatividade. Conforme a Figura 5, pode-se observar que a irradiação a qual o material pode ser submetido pode variar conforme o ensaio escolhido. As indústrias automobilísticas e eletroeletrônicas geraram uma grande demanda de criarem-se procedimentos para estudo de incidência de luz natural filtrada por vidros, o que comumente acontece em seus produtos durante seu tempo de vida.

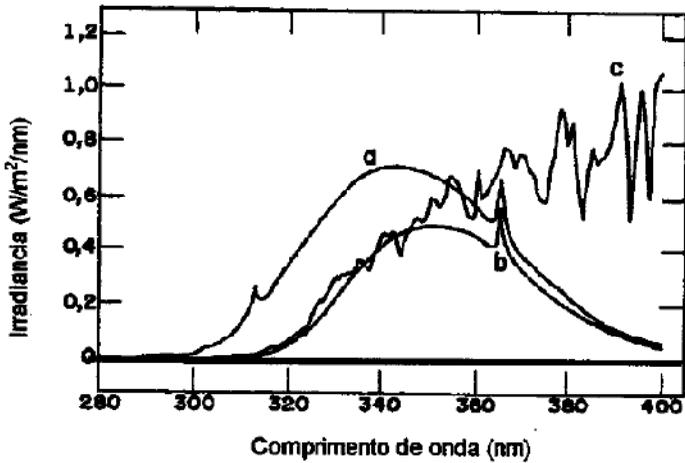


Figura 5: Comparação dos espectros de onda: a) Lâmpada UV-A não Filtrada, b) UV-A filtrada com vidro e, c) luz solar filtrada com vidro<sup>[21]</sup>.

Como se pode observar na Figura 6, as ondas que correspondem à faixa do UV-B são expressivamente mais agressivas ao polimérico quando esta é filtrada por vidro do que quando tem incidência direta no material.

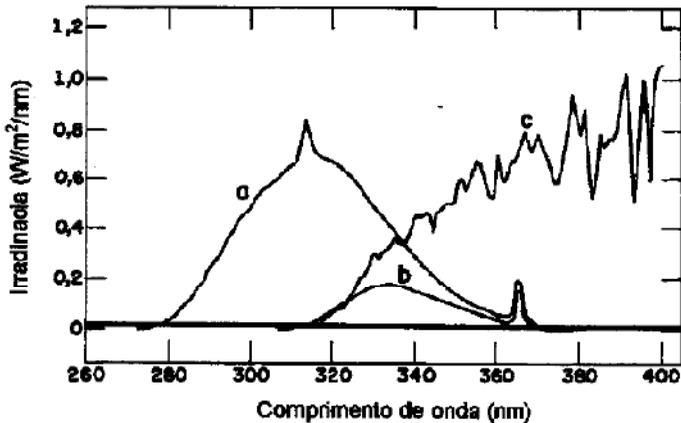


Figura 6: Comparação dos espectros de onda: a) Lâmpada UV-B não Filtrada, b) UV-B filtrada com vidro e, c) luz solar filtrada com vidro<sup>[21]</sup>.

Para a realização do ensaio de envelhecimento acelerado existem equipamentos apropriados que utilizam lâmpadas especiais capazes de liberar luz basicamente no comprimento de onda desejado, simulando diferentes condições conforme apresentado nas figuras anteriores. Estes ensaios são normalmente normatizados, atendo-se a pontos importantes como controle de potência das lâmpadas e temperatura ambiente no qual o material será exposto. Existem diversos estudos que procuram mensurar o tempo em que o material é exposto ao ensaio de envelhecimento acelerado com o tempo de envelhecimento natural, mas pode-se notar que esta informação é bastante variável, pois depende diretamente aos diferentes tipos de aplicações, processamento e exigência requerida para a peça em questão<sup>[21]</sup>.

### **3.3.3 Envelhecimento Térmico**

O sistema de envelhecimento térmico tem como principal intuito fornecer informações de forma acelerada a respeito do comportamento do polímero ou seus aditivos tendo como exemplo, os estabilizantes térmicos, frente à degradação térmica. Muito importante e freqüente para os materiais polimérico, o envelhecimento térmico pode simular desde o histórico térmico gerado durante o processamento até temperaturas consideráveis durante a fase de aplicação do material polimérico.

Como já citado, é possível gerar subsistemas de degradação para dar maior representatividade ao sistema de envelhecimento térmico. Juntamente a união de calor e irradiação de luz, pode-se integrar a umidade, solventes ou outros compostos durante o ensaio. Entretanto, é importante salientar que deve ser corretamente analisada a rampa de temperatura a que o material será submetido. Por exemplo, para polímeros amorfos, busca-se aplicar a temperatura em torno de 10 – 20°C abaixo da Tg (temperatura de transição vítrea) do material. É importante que a temperatura aplicada não altere as condições físicas e morfológicas do material, pois este fato pode alterar significativamente as respostas que este ensaio pode fornecer.

## 4. TÉCNICAS DE ACOMPANHAMENTO DA DEGRADAÇÃO

O processo de envelhecimento do material é acompanhado por métodos que fornecem, informações sobre mudanças químicas ou físicas. A escolha dos métodos é fortemente dependente do modo de degradação de um polímero específico e da propriedade de interesse.

As respostas quanto à degradação podem ser feitas de forma comparativa a outro material ou ainda comparando ao seu estado natural (anterior ao início do ensaio de envelhecimento). São variadas as respostas de um material polimérico frente a sua degradação, sendo elas físicas e químicas. Os métodos instrumentais mais usuais para a detecção ou acompanhamento de processos de degradação ou produtos de degradação são: (i) métodos espectroscópicos, tais como: espectrometria no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), espectrometria de Raman e ultravioleta (UV-vis), (ii) métodos térmicos, como por exemplo: análise termogravimétrica (TGA), calorimetria diferencial exploratória (DSC), (iii) determinação da variação de massa molar por viscosimetria ou cromatografia por exclusão de tamanho (SEC), (iv) análise de produtos voláteis, (v) análise de produtos solúveis, (vi) ensaios mecânicos sob tração, impacto; (vii) medida de ângulo de contato e; (viii) métodos reométricos.

Estas técnicas podem ajudar a compreender melhor a termodinâmica e a cinética das reações envolvidas no processo de envelhecimento do material polimérico. Apesar de fornecerem informações consideravelmente significativas, devem-se considerar as condições em que as amostras foram geradas e na escolha do sistema de envelhecimento.

### 4.1 ENSAIOS MECÂNICOS

Ensaio mecânicos podem ser definidos como procedimentos padronizados que podem ser usados como ferramentas de avaliação de alterações químicas ou físicas que possam afetar de forma significativa as propriedades do material. Estes ensaios podem gerar informações quantitativas em que podem ser utilizadas para correlacionar alterações físicas ou químicas do material, como degradação térmica, por exemplo.

#### **4.1.1 Ensaio de resistência a Tração**

O ensaio de tração utiliza corpos-de-prova padronizados que sofrem uma deformação a uma taxa constante, indicando a variação de tensão ao longo do ensaio. Este método fornece uma vasta gama de informações como tensão de ruptura, tensão de escoamento, módulo de elasticidade entre outros. Estas informações podem ter diferentes utilidades, desde a escolha do material mais apropriado para uma determinada aplicação até para poder conferir o efeito do envelhecimento do material polimérico. Geralmente a queda no alongamento na ruptura é a informação mais evidente no processo degradativo de um material polimérico.

#### **4.1.2 Ensaio de resistência ao Impacto**

O ensaio de resistência ao impacto é um dos ensaios mecânicos mais simples e rápidos de ser realizado. Este ensaio consiste em submeter um determinado corpo de prova a um impacto de um pêndulo e registrar a energia consumida para rompê-lo. Geralmente espera-se uma queda nos valores encontrados quando o material é submetido a um processo degradativo.

### **4.2 ANÁLISE TÉRMICA**

Os ensaios de análise térmica podem ser utilizados para verificar de forma qualitativa e quantitativa as alterações nas propriedades físicas e químicas do material. Pode ainda indicar mudanças morfológicas, cinética e termodinâmica de alterações do material polimérico. Estas informações são importantes para constatar e conhecer a evolução degradativa de um material polimérico de interesse.

Análises como o TGA (Análise Termogravimétrica), por exemplo, pode indicar, além de transições como início de degradação, a presença de compostos inorgânicos como cargas e aditivos, que pode auxiliar na determinação de um material desconhecido.

#### 4.2.1 Análise Dinâmico-Mecânica (DMA)

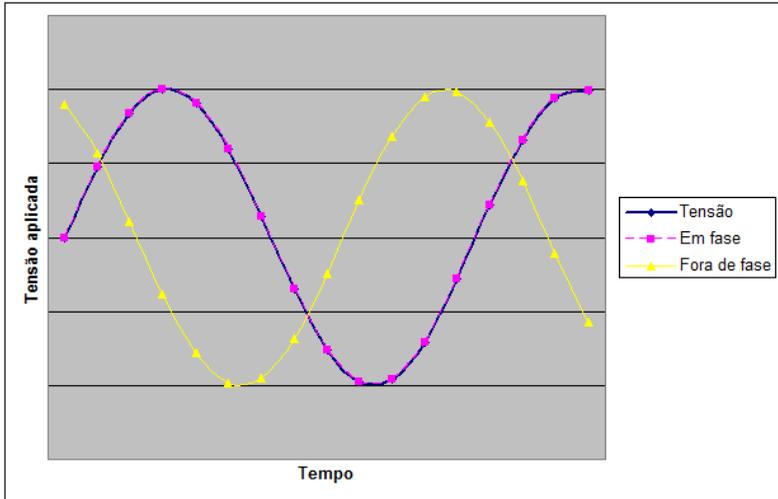
A análise Dinâmico-Mecânica é vastamente utilizada na caracterização de polímeros por ser um equipamento de grande sensibilidade, sendo capaz de informar eventos como relaxações conhecidas do material, como  $T_g$  ou  $T_m$ , e ainda relaxações secundárias, que não são perceptíveis em outros ensaios como Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) ou Análise Termomecânica (TMA).

O equipamento fornece informações sobre a variação do módulo elástico ( $E'$ ), do módulo de dissipação viscosa ( $E''$ ) e do amortecimento mecânico ou atrito interno ( $\tan\delta = E''/E'$ ) de um material. Estas informações podem ser correlacionadas para determinar tenacidade, resistência ao impacto, envelhecimento (utilizado para este trabalho), tempo de vida sob fadiga, resistência a propagação de trincas, rigidez, módulo de amortecimento, informações sobre vulcanização, miscibilidade de blendas poliméricas entre diversos outros.

A análise dinâmico-mecânica consiste na aplicação de uma tensão ou deformação mecânica oscilatória, geralmente do tipo senoidal, a um sólido ou líquido viscoso. Geralmente este ensaio é realizado a partir da variação de frequência de oscilação ou temperatura, e mede-se a deformação sofrida pelo material ou a tensão resposta.

Para um sólido elástico ideal que obedece a Lei de Hooke<sup>[10]</sup>, a deformação do material é proporcional à tensão aplicada, enquanto que para material viscoso ideal, sua deformação obedecerá à Lei de Newton. Todos os materiais poliméricos têm comportamento viscoelástico, definido por deformações plásticas e elásticas ao mesmo tempo quando se é submetido a uma determinada tensão. A contribuição elástica e viscosa para o comportamento mecânico do polímero depende da temperatura e da escala de tempo do experimento.

A Figura 7 ilustra a deformação resposta de um sólido Hookiano (em fase) e de um fluido de Newton (fora de fase) quando é aplicada uma tensão do tipo senoidal.



**Figura 7: Respostas de diferentes materiais a uma tensão aplicada.**

Então, pode-se definir de maneira genérica a deformação cíclica de um material conforme a equação 1:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \text{sen}(wt) \quad \text{Eq. 1}$$

Onde  $\varepsilon(t)$  é a deformação a um dado tempo,  $\varepsilon_0$  é a deformação na amplitude máxima,  $w$  é a frequência de oscilação e  $t$  é o tempo.

Da mesma maneira, obtêm-se a deformação “resposta” de um material quando é aplicada uma tensão a uma frequência pré-estabelecida conforme a equação 2.

$$\sigma(t) = \sigma_0 \text{sen}(wt) \quad \text{Eq. 2}$$

Onde  $\sigma(t)$  é a tensão a um dado tempo e  $\sigma_0$  é a tensão máxima.

Para os materiais poliméricos nesta equação deve constar ainda à defasagem para a tensão relacionada à fase plástica (Eq.3).

$$\sigma(t) = \sigma_0 \text{sen}(wt + \delta) \quad \text{Eq. 3}$$

Onde  $\delta$  é o ângulo de fase ou defasagem.

A equação 3 pode ser descrita de acordo com a equação 4:

$$\sigma(t) = \sigma_0[\sin(\omega t)\cos(\delta) + \cos(\omega t)\sin(\delta)] \quad Eq. 4$$

Desta forma, a tensão pode ser considerada composta por duas componentes, uma em fase com a deformação e outra fora de fase. A partir de cada uma dessas componentes, pode-se calcular o módulo de elasticidade para cada caso (Eq.5).

$$E = \frac{\text{amplitude da tensão}}{\text{amplitude da deformação}} = \sigma/\epsilon \quad Eq. 5$$

então pode-se calcular o módulo segundo as equações 6 e 7.

$$E' = \sigma'/\epsilon' = \sigma_0/\epsilon \cos(\delta) \quad Eq. 6$$

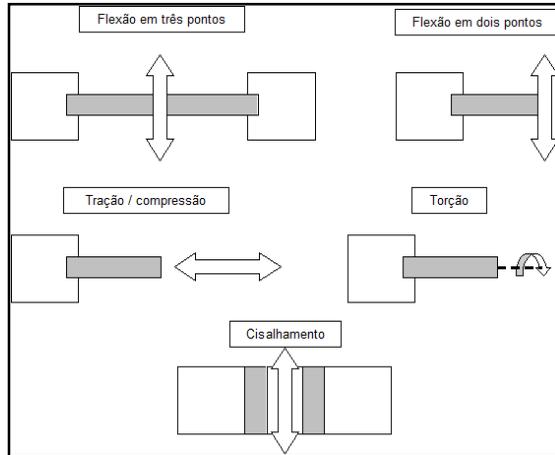
$$E'' = \sigma''/\epsilon'' = \sigma_0/\epsilon \sin(\delta) \quad Eq. 7$$

Com isso define-se o módulo de armazenamento ( $E'$ ) como sendo a componente elástica do material, cuja deformação está em fase com a tensão aplicada. O módulo de perda ( $E''$ ) é relativo a componente plástica e sua deformação está fora de fase em relação a tensão aplicada.

Desta maneira, também é obtida a tangente de perda que pode ser obtida pela razão entre  $E''$  por  $E'$ .

#### 4.2.1.1 Técnicas de ensaio do DMA

Para a realização do ensaio, podem-se utilizar diferentes tipos de sistemas de aplicação da tensão, dependendo da resposta desejada. A Figura 8 abaixo indica os diferentes tipos de aplicação de tensão.



**Figura 8: Modos de solicitação mecânica no ensaio de DMA.**

Utilizando um destes modos, é possível dar início ao ensaio, determinando-se a frequência de aplicação da tensão, tensão máxima aplicada, taxa de aquecimento, dependendo da resposta desejada.

### 4.3. ENSAIOS ESPECTROSCÓPICOS

Os ensaios espectroscópicos consistem em um conjunto de técnicas que possibilitam a obtenção de informações sobre um desejado material baseado na interação que este tem com a luz. As diferenças básicas dos ensaios conferem-se a região espectral de luz utilizada e o tipo de efeito analisado.

#### 4.3.1 Espectrometria de Infravermelho

A espectroscopia de infravermelho (IR) é uma das técnicas mais importantes e utilizadas na química em geral. Além de aplicação em trabalhos rotineiros como um simples controle de qualidade também pode ser utilizado para informar composições de estruturas complexas. Apesar de ser uma técnica que exige do operador do equipamento um vasto conhecimento, o equipamento tem seu método de uso relativamente simples.

Seu funcionamento consiste em captar as vibrações das ligações atômicas, que são diferentes entre si, variando a vibração de acordo com o tipo de ligação (covalente ou não) e ligação entre componentes distintos. A amostra é preparada objetivando criar um filme de baixa espessura, podendo este filme ser uma solução onde a amostra está dissolvida, ou um filme fundido. Após a preparação da amostra, a mesma é disposta em local definido no equipamento IR e então é aplicado um feixe de ondas com variadas frequências. Ao passar pela amostra, o material em questão irá absorver as ondas equivalentes a cada ligação com objetivo de dar mais energia aos elétrons. No local da amostra está localizado um receptor das ondas inicialmente geradas, então o receptor capta as ondas que não foram absorvidas pela amostra e informa ao software quais frequências e intensidade de ondas foram absorvidas. Esta informação é passada para o operador da máquina em forma de um gráfico que indica as faixas de ondas que foram absorvidas pela amostra. Com base neste gráfico, o operador irá comparar com variados padrões catalogados e definir a composição do material e as ligações que cada componente está fazendo. Com estas informações em mãos o operador pode definir o material da amostra.

#### 4.4. ÍNDICE DE AMARELECIMENTO

O amarelamento de um material polimérico é comumente entendido como a evolução degradativa do mesmo. Este amarelamento é o resultado do surgimento de compostos que possuem uma grande absorção da luz na faixa espectral do amarelo. Geralmente o monômero butadieno é o primeiro a ser afetado pelo processo degradativo. Pelo fato de possuir ligações de menor energia, estes são os primeiros a serem quebrados formando sub-componentes, causando alterações micro e macroscópicas. Acompanhando a evolução do processo fotodegradativo é possível calcular o seu índice de amarelecimento (*Eq. 8*), sabendo-se que o equipamento que faz esses cálculos leva em consideração alterações de outros parâmetros que também sofrem alterações como o âmbar, verde e azul.

$$YI = [100(1,28.X_{CIE} - 1,06.Z_{CIE}/Y_{CIE})]$$

*Eq. 8*

Onde:  $YI$  = índice de amarelecimento

$X_{CIE}$  = parâmetro relativo ao âmbar

$Z_{CIE}$  = parâmetro relativo ao verde

$Y_{CIE}$  = parâmetro relativo ao azul

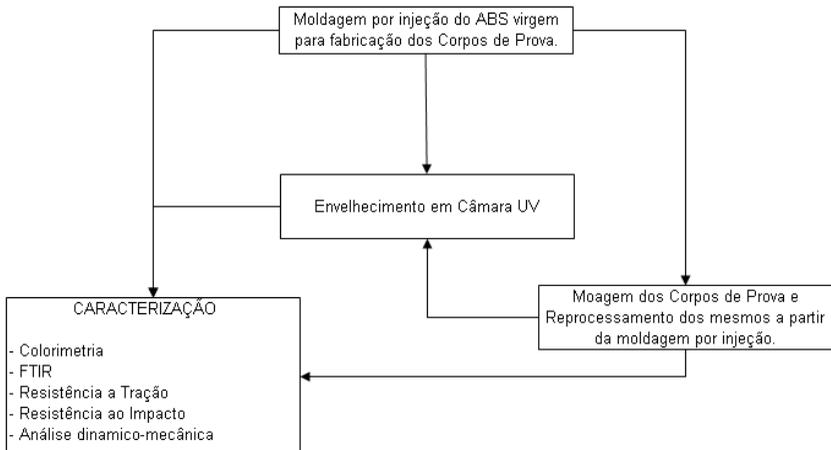
O grau de amarelecimento tem grande importância para aplicações que tem exigência estética e principalmente quando possui interfaces com outros materiais que possuem uma resistência ao amarelecimento significativamente maior do que este. Além de avaliar o quantitativamente o amarelecimento do polímero, pode-se fazer uma correlação qualitativa quanto à perda de propriedades mecânicas do polímero.

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

O copolímero de acrilonitrila butadieno estireno utilizado neste trabalho foi o ABS de nome comercial GPM 5600 fabricado pela GE e fornecido gentilmente pela Whirlpool S.A. – Unidade de Eletrodomésticos.

### 5.1 METODOLOGIA

A seguir será apresentado o procedimento adotado para a fabricação das amostras e ensaios realizados. A Figura 9 apresenta um fluxograma da fabricação e ensaios envolvidos neste trabalho.



**Figura 9: Fluxograma para fabricação e ensaios envolvidos.**

## 5.2 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA POR INJEÇÃO.

Seguindo a ficha técnica do material constante como Anexo A, este foi seco durante 4 horas para eliminação de qualquer umidade residual em uma estufa convencional de prateleiras a temperatura de 90°C.

Após o tempo de secagem, a injetora Sandretto modelo 50 (Figura 10) foi abastecida com material virgem para a fabricação dos corpos-de-prova, utilizando um molde de gavetas padrão ISO (Figura 11) para fabricação de corpos-de-prova de tração, impacto e plaquetas de cor. Para a incorporação de material reprocessado na massa de ABS virgem foi utilizada uma balança de precisão modelo Balantec com precisão de  $\pm 1$ g.



**Figura 10: Injetora Sandretto 50.**



**Figura 11: Molde ISO com cavidade de corpo de prova de impacto (a), moldes ISO de tração (b) e cor (c).**

Para a fabricação dos corpos de prova a partir da resina virgem, a injetora foi parametrizada conforme as informações dadas pela ficha técnica do material fornecida pelo fabricante, conforme Anexo A.

A fabricação das amostras foi feita simulando condições normais de processamento do material (Tabela 2), com exceção da temperatura de processamento, que foi ajustada para 250°, temperatura esta próxima do limite superior do material (260° C) para simular a fabricação de peças de média-alta complexidade, parâmetro de grande influência na cinética de degradação termomecânica do material.

**Tabela 2: Parâmetros utilizados para fabricação dos corpos-de-prova através da moldagem por injeção.**

	Padrão de cor	Tração	Impacto
Teste	Padrão de cor	Tração	Impacto
Parâmetros			
Dosagem (mm)	41	48	52
Vel. Injeção (cm <sup>3</sup> /s)	55	55	55
Pressão (bar)	400	400	400
Recalque (s)	5 @ 300 bar	5 @ 300 bar	5 @ 300 bar

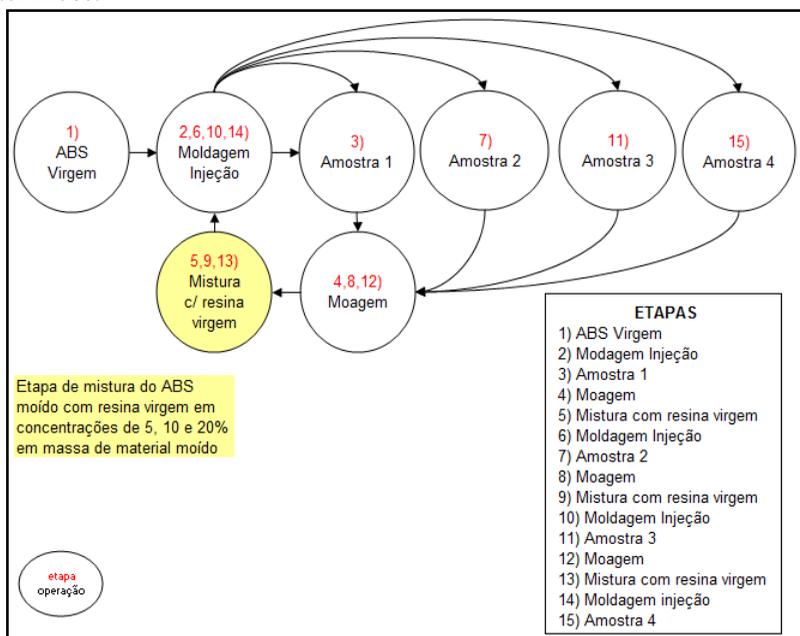
Das amostras fabricadas foram coletadas quantidades pré-determinadas para caracterização do material, outras foram submetidas ao ensaio de envelhecimento em câmara UV e as restantes para envelhecimento térmico.

### 5.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA ENVELHECIMENTO TÉRMICO

A fim de verificar a influência do reprocessamento nas propriedades do ABS, foram produzidas amostras com diferentes históricos térmicos, conforme as etapas a seguir: a) corpos-de-prova moldados por injeção foram levados a um moinho convencional de facas para sua moagem, formando as matérias-primas, denominadas de Amostra 1. Para a moagem, o moinho foi totalmente aberto e limpo para eliminar a possibilidade de contaminação por outros materiais. b) Este moído foi misturado em proporção controlada com resina virgem e utilizado para a confecção de novos corpos-de-prova que seguiram o mesmo procedimento das amostras de resina virgem (separação para caracterização, envelhecimento e material extra para envelhecimento térmico subsequente). O resultado desta primeira mistura com ABS virgem é o material com segundo histórico térmico, que foi denominado como “Amostra 2”. c) A Amostra 2 foi novamente moída e incorporada

a resina virgem para a confecção de amostras com terceiro histórico térmico, denominada por “Amostra 3”. d) A mesma metodologia foi utilizada para a fabricação da “Amostra 4”.

A Figura 12 ilustra o fluxograma das etapas e operações realizadas para a fabricação das amostras com diferentes históricos térmicos.



**Figura 12: Etapas e operações para fabricação das amostras.**

A mistura de resina virgem e material reprocessado supracitado foi realizada em proporções de 95/5 (m/m) (denominado como A), 90/10 (m/m) (denominado como B) e 80/20 (m/m) (denominado como C), utilizando o moído com o primeiro, segundo e terceiro histórico térmico.

Desta maneira foi criada uma nomenclatura para melhor entendimento das diferentes amostras: O valor numérico apresentado refere-se a quantidade de processamentos o qual o material foi submetido (1 = Matéria-prima virgem processada 1 vez, 2 = material processado duas vezes, 3 = material processado três vezes, 4 = material processado quatro vezes). As letras adotadas referem-se ao percentual em massa de material reprocessado incorporado a resina virgem para a composição (A = adição em massa de 5% de material reprocessado, B =

adição de 10% de material reprocessado, C = adição de 20% de material reprocessado). Desta maneira, por exemplo, quando citada a amostra 2A refere-se ao material com 5% em massa de material reprocessado uma vez.

Para que a concentração de material reprocessado incorporado na mistura de cada amostra permaneça com a concentração correta, utilizou-se o material moído com concentrações pré-estabelecidas. Por exemplo, a amostra 3A é constituída de 95% em massa de material virgem e 5% em massa da amostra 2, que é o material reprocessado uma vez. O material 2A, por sua vez, apresenta a composição de 95% em massa de resina virgem e 5% em massa da amostra 1. O mesmo procedimento foi adotado para a confecção das amostras nas concentrações mássicas de 10 e 20% de material reciclado denominados de B e C, respectivamente, conforme apresentado na Tabela 3.

**Tabela 3: Plano de testes para fabricação de amostras**

Amostras	Amostra 1	Amostra 2			Amostra 3			Amostra 4			TOTAL
#	#1	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
% nas amostras		5%	10%	20%	5%	10%	20%	5%	10%	20%	
<b>Etapas</b>	<b>1</b>	<b>2</b>			<b>3</b>			<b>4</b>			xx
<b>Ensaio</b>											
Tração	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	50
Impacto	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	50
Cor	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	20
Padrão de cor	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	20
Envelhecimento	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	50
Total	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	190
Procedimento de mistura		1#1			2#1			3#1			

Buscando maior repetibilidade na produção das diferentes amostras, a cada troca de cavidade do molde, descartavam-se as primeiras oito amostras geradas para que a temperatura do molde fosse estabilizada (aproximadamente 40°C), garantindo a troca total de material contido no cilindro da injetora e validação dos parâmetros, quando havia a necessidade de ser alterado.

Entendeu-se como importante utilizar os mesmos parâmetros de processamento para a fabricação das amostras 1 e os materiais reprocessados 1, 2 e 3 respectivamente, garantindo desta maneira que as condições de processamento fossem iguais para todas as amostras. Entretanto, isso não foi possível já que, para a dosagem e pressão de recalque, houve a necessidade de alteração, pois foi constatado que com

os parâmetros iniciais não havia o total preenchimento da cavidade do molde. As alterações realizadas podem ser contempladas na Tabela 4.

**Tabela 4: Parâmetros de processamento ajustados.**

Amostras	Padrão de cor				Tração				Impacto			
	Amostra 1	2A, 2B, 2C	3A, 3B, 3C	4A, 4B, 4C	Amostra 1	2A, 2B, 2C	3A, 3B, 3C	4A, 4B, 4C	Amostra 1	2A, 2B, 2C	3A, 3B, 3C	4A, 4B, 4C
Parâmetros												
Dosagem (mm)	41	42	43	44	48	48	49	50	52	52	54	55
Vel. Injeção (cm <sup>3</sup> /s)	55				55				55			
Pressão (bar)	400				400				400			
Recalque (s)	5 @ 300 bar				5 @ 300 bar				12 @ 450 bar			

#### 5.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA ENVELHECIMENTO POR ATAQUE UV

O ensaio de envelhecimento por ultravioleta foi realizado com o auxílio da câmara de envelhecimento de marca Solarbox modelo 1500, mostrado na Figura 13, utilizando uma lâmpada que simula o ataque de luz natural sendo transmitida através de um vidro (luminante D65).

Foram submetidos para este ensaio, corpos-de-prova de tração, impacto e cor das amostras processada 1 vez (amostra 1) e processadas 2, 3 e 4 (A,B e C). As amostras de impacto foram dispostas com a face de entalhe para exposição direta da luz UV. As amostras foram submetidas a uma temperatura de 40°C em 360h de envelhecimento.



**Figura 13: Câmara de envelhecimento Solarbox modelo 1500.**

## 5.5 CARACTERIZAÇÃO

### 5.5.1 ESPECTROMETRIA DE INFRAVERMELHO

Para a realização deste ensaio, as amostras foram preparadas extraíndo 1g de material de cada amostra (1, 2C, 3C e 4C), solubilizando-as em tolueno em placas de Petri e, após totalmente dissolvidas, estas placas foram aquecidas a 50° C para acelerar a evaporação completa do solvente resultando em um filme fino de espessura não controlada. Destes filmes foram extraídas as amostras para o ensaio espectroscópico.

O ensaio foi realizado em um equipamento TermoNicolet modelo IR 2000 spectrometer. Antes da realização das leituras foi realizada uma prova em branco de 16 varreduras. Para cada amostra analisada foram feitas 16 varreduras.

### 5.5.2 ENSAIO DINÂMICO-MECÂNICO (DMA)

Para a realização do ensaio Dinamico-mecânico foram utilizados corpos de prova com dimensões pré-estabelecidas de 35 x 5 x 1,4mm das amostras 1, 2B, 3B e 4B selecionadas devido ao percentual intermediário de material reprocessado incorporado, o que apresentaria uma tendência de comportamento. O equipamento utilizado foi o Q800 da TA Instruments localizado no laboratório do CIMJECT do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC. O equipamento utiliza uma garra para ensaios em flexão em dois pontos, denominado como *single cantilever*. O gradiente de temperatura adotado variou entre -120°C a 120°C em uma escala de aquecimento de 3°C/min, em frequência de 1Hz e deformação máxima de 0,5%.

### 5.5.3 COLORIMETRIA

O ensaio de colorimetria foi realizado em um Colorímetro – Gretag Macbeth modelo Color Eye 3100 utilizando plaquetas padrão ISO. Os ensaios de colorimetria foram realizados para as todas as amostras envelhecidas de maneira termomecânica pelo seu processamento e por ataque UV. As leituras de cor foram feitas a cada 72 h para avaliar a evolução do amarelecimento.



**Figura 14: Colorímetro Gretag Macbeth modelo Color Eye 3100.**

#### 5.5.4 ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios mecânicos foram realizados para verificar de forma quantitativa as alterações das propriedades físicas do material e, de forma comparativa, avaliar a influência da incorporação e concentração de material reprocessado no ABS em estudo.

Foram realizados testes de Resistência a Tração e Impacto de quatro corpos-de-prova padrão ISO de cada condição (Amostras 1,2,3 e 4, na concentração de 5%, 10% e 20% em massa, sem ataque UV ou com ataque UV).

Sabe-se que, devido principalmente a presença de ligações duplas em sua cadeia, a fase elastomérica é mais susceptível a iniciação do processo de degradação. Tais ligações possuem menor energia de ligação e podem ser facilmente quebradas em ambientes agressivos como calor, luz ou pressão, por exemplo. A quebra dessas ligações resulta, em grande parte, no aumento da presença de ligações cruzadas, reduzindo assim a sua mobilidade molecular, o que aumenta perceptivelmente a rigidez do polímero. Desta forma, as principais

características avaliadas são as que podem ser afetadas por este tipo de alteração molecular, como Alongamento total e Alongamento na ruptura, além da queda de Resistência ao Impacto.

#### **5.5.4.a Ensaio de Resistência a Tração**

O ensaio de resistência à tração foi realizado em um equipamento Sintech modelo 10D. Quatro corpos de prova foram testados de cada material gerado neste trabalho conforme norma ISO 527, utilizando uma célula de carga de 500 kgf a uma velocidade de 5mm/min.

#### **5.5.4.b Ensaio de Resistência ao impacto**

O ensaio de Resistência ao Impacto seguiu a norma ISO 180 utilizando corpos de prova entalhados em 45° em um equipamento Emic. Foram realizados testes em 04 amostras por tipo de material aplicado, utilizando um pêndulo de 2,7 kg a temperatura ambiente e umidade controlada.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 Espectrometria de Infravermelho

Observam-se a partir do espectro apresentado na Figura 15 as principais bandas de absorção dos meros que compõem o ABS não envelhecido (Amostra 1). Estão relacionadas à acrilonitrila as bandas em 2249, 2944 e 1470  $\text{cm}^{-1}$ , às quais são referentes à deformação axial de  $\text{C}\equiv\text{N}$ , deformação de C-H alifático e deformação angular simétrica no plano de  $\text{CH}_2$ , respectivamente. As bandas de absorção características do butadieno podem ser observadas em 3090, 1648 e 1470  $\text{cm}^{-1}$ , as quais estão relacionadas à deformação axial de C-H; C=C alifático e deformação angular simétrica no plano de  $\text{CH}_2$ , respectivamente. Também são relacionadas ao butadieno as bandas em 966 e 911  $\text{cm}^{-1}$  que podem ser atribuídas às deformações no plano e angular, respectivamente, das ligações do C=C alifático. As principais bandas do estireno podem ser identificadas no espectro em 3017  $\text{cm}^{-1}$  devido à deformação angular fora do plano de C-H (anel aromático); 3067  $\text{cm}^{-1}$  deformação axial de C-H aromático; em 1605 e 1493  $\text{cm}^{-1}$  à deformação axial de C=C do anel aromático e em 761  $\text{cm}^{-1}$  deformação angular fora do plano de C-H do anel aromático. A Tabela 5 apresenta as principais bandas de absorção da Amostra 1 (ABS sem ataque UV).

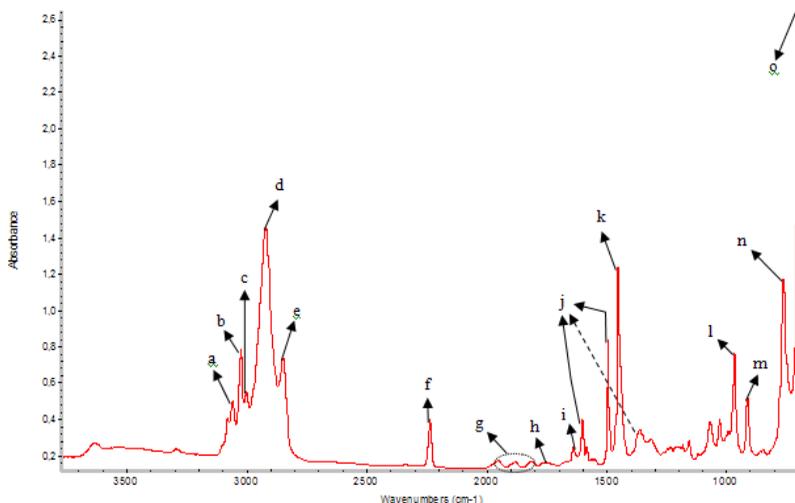
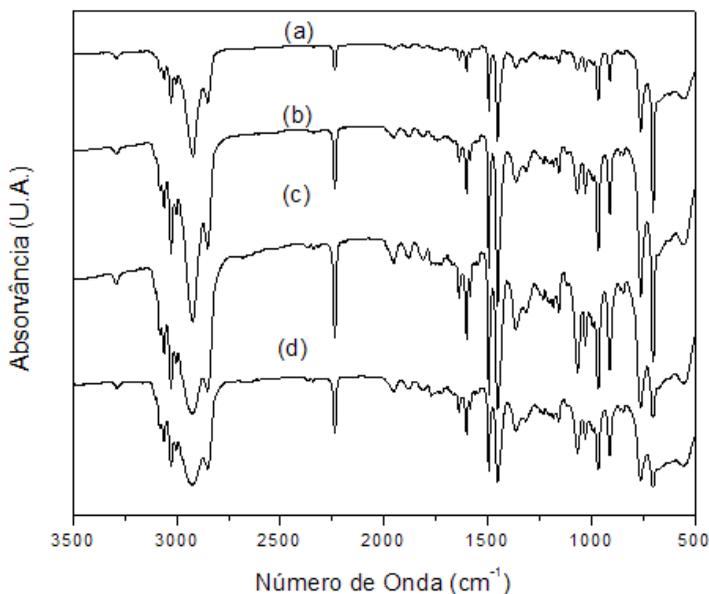


Figura 15: Espectro de FTIR da Amostra 1 sem ataque UV.

**Tabela 5: Principais bandas de absorção do espectro de infravermelho do ABS.**

Banda	Número de onda (cm <sup>-1</sup> )	Grupos de Absorção	Tipo de deformação
a	3090	C–H e =C–H;	Deformação axial
b	3017	C–H aromático	Deformação angular fora do plano
c	3067	C–H aromático	Deformação axial
d	2944	C–H alifático	Deformação axial
e	2860	C–H metileno	Deformação axial
f	2249	C≡N	Deformação axial
g	2000-1810	C=C do anel	Deformação axial
h	1746	C=O	Deformação axial
i	1648	C=C alifático	Deformação axial
j	1605, 1493 e 1378	C=C do anel	Deformação axial
k	1470	CH <sub>2</sub>	Deformação angular simétrica no plano
l	966	C=C alifática	Deformação angular no plano
m	911	C=C alifática	Deformação angular
n	761	C–H do anel	Deformação angular fora do plano
o	707	C=C aromático	Deformação angular

Comparando-se os espectros de FTIR das amostras 2C, 3C e 4C (materiais reprocessados e com ataque UV) na região entre 1900 a 1100 cm<sup>-1</sup> com a amostra 1 foi possível observar o aparecimento de baixa intensidade da banda de estiramento de carbonilas ou C=O, conforme indicado na Figura 16. De acordo com trabalhos reportados na literatura, a degradação do ABS por FTIR pode ser evidenciada a partir do aumento de produtos de degradação na região de 1746 a 1724 cm<sup>-1</sup>[14, 16, 20, 22]. Além disso, a intensidade das bandas em 1231 e 1746 cm<sup>-1</sup> continuaram baixas.



**Figura 16: Espectros de infravermelho de: a) amostra 1 não envelhecida (referência) e amostras b) 2C, c) 3C e d) 4C com ataque UV, respectivamente.**

Conforme comentado anteriormente, a degradação térmica e fotooxidativa do ABS levam a reticulação do componente elastomérico, deteriorando as propriedades elásticas desta fase. Desta maneira, foi verificada a redução das intensidades das bandas de absorção referentes à ligação C=C do butadieno em função do seu envelhecimento térmico e fotooxidativo.

Para avaliar qualitativamente a alteração das alturas das bandas em 966 ou 911  $\text{cm}^{-1}$ , relacionadas à insaturação da fase elastomérica, foi necessário utilizar a relação entre picos para excluir as influências de concentração, que tem sua espessura variada de acordo com a preparação de cada amostra. Utilizou-se como referência a banda em 2250  $\text{cm}^{-1}$  que está relacionada à vibração do grupo C≡N, conforme indicado na Figura 17. Esta banda foi utilizada como referência, pois foi considerado que a acrilonitrila é menos susceptível e sua absorção no espectro de FTIR é pouco afetada ao envelhecimento térmico e fotooxidativo.

Estas correlações de altura ou áreas de picos podem indicar o aumento ou redução da ligação avaliada, como também determinar de

maneira qualitativa a evolução degradativa de um polímero, informação desejada neste trabalho. A partir da relação de bandas (966/2250) ou (911/2250) foi possível construir curvas destas razões em função da evolução de envelhecimento térmico<sup>[10]</sup>, conforme apresentadas na Figura 18.

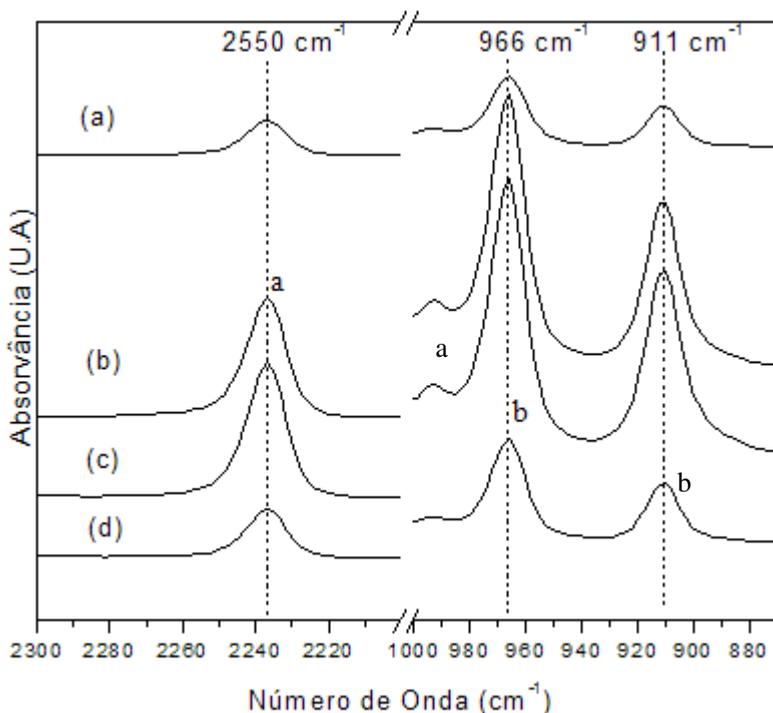
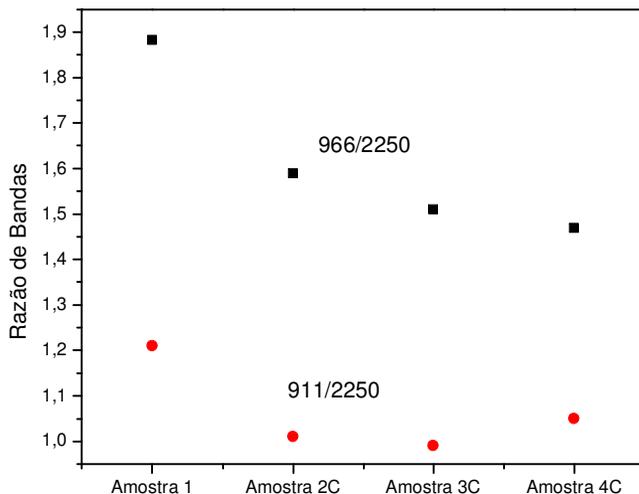


Figura 17: Espectros de FTIR da (a) amostra 1; e amostras envelhecidas por ataque UV. Picos de a) 911 $\text{cm}^{-1}$  e b) 966 $\text{cm}^{-1}$  de diferentes amostras envelhecidas.: b) 2C; 3C e 4C, respectivamente.



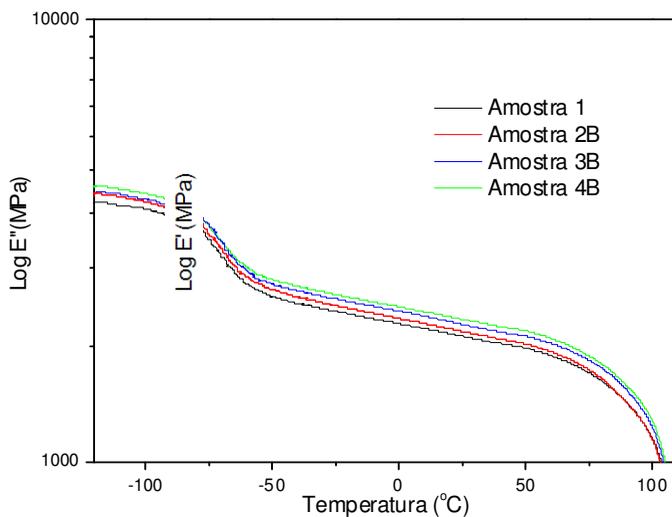
**Figura 18: Correlação entre picos de 966/2250 e 911/2250 das amostras 1, 2C, 3C e 4C.**

Observa-se uma redução da concentração de ligações C=C encontrada na fase elastomérica do ABS. Esta redução sugere a degradação do polímero, a quebra da ligação dupla, pode-se formar ligações cruzadas, elevando a rigidez do polímero e, basicamente, é o que indica a quebra desta ligação. Pode-se notar que esta redução é mais sensível para as bandas relacionadas à vibração angular fora do plano do que a absorção angular no plano das ligações C=C.

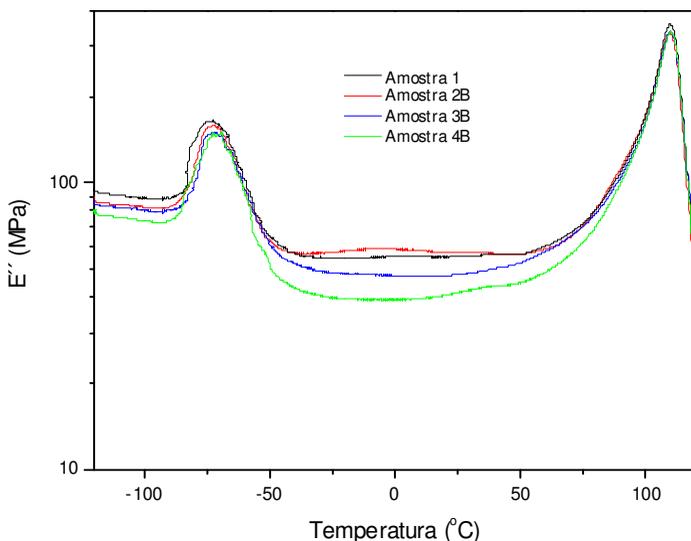
## 6.2. Ensaio dinâmico-mecânico (DMA)

A análise comparativa das curvas de Módulo de Armazenamento ( $E'$ ) e módulo de perda ( $E''$ ) em função da temperatura para Amostra 1 (referência) com as misturas de ABS virgem/ABS envelhecido termicamente (90/10) (m/m) evidencia o aumento da rigidez e redução da dissipação viscosa com a adição de material reciclado. Este fato era esperado, uma vez que os envelhecimentos térmico e fotooxidativo possibilitam a formação de ligações cruzadas da fase elastomérica,

reduzindo a movimentação molecular do material. Conseqüentemente ocorrerá o aumento da contribuição da componente elástica e redução da dissipação viscosa do material, conforme pode ser claramente observado na Figura 19 e na Figura 20.



**Figura 19: Curvas do Log Módulo de Armazenamento em função da temperatura para a amostra 1 e diferentes misturas de ABS virgem/material reciclado na proporção de 90/10(m/m).**

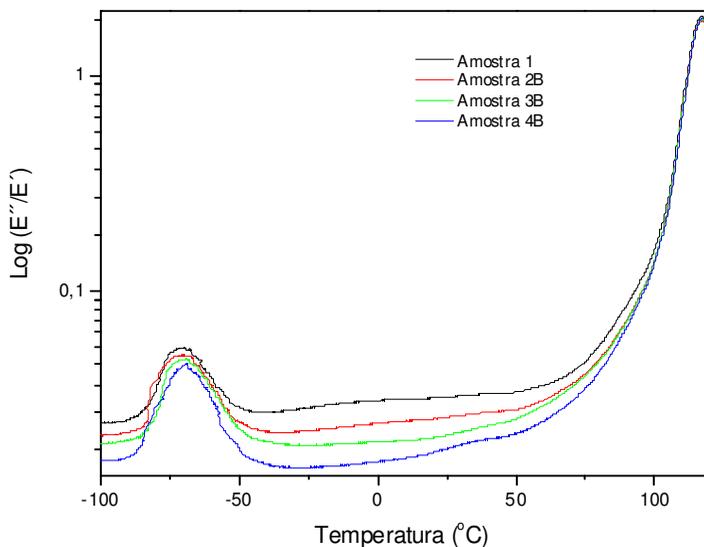


**Figura 20: Curvas do Log Módulo de Perda em função da temperatura para a amostra 1 e diferentes misturas de ABS virgem/material reciclado na proporção de 90/10 (m/m).**

A Figura 21 apresenta as curvas de log da tangente de perda ( $E''/E'$ ) em função da temperatura para amostras submetidas à degradação térmica e fotooxidativa, amostras 1, 2B, 3B e 4B. A amostra não envelhecida apresenta duas relaxações estreitas e bem definidas relacionadas às transições primárias das fases de butadieno e SAN. A primeira relaxação com máximo em aproximadamente  $-71^{\circ}\text{C}$  e a segunda com máximo em  $117^{\circ}\text{C}$  são atribuídas à temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) das fases de butadieno e SAN, respectivamente.

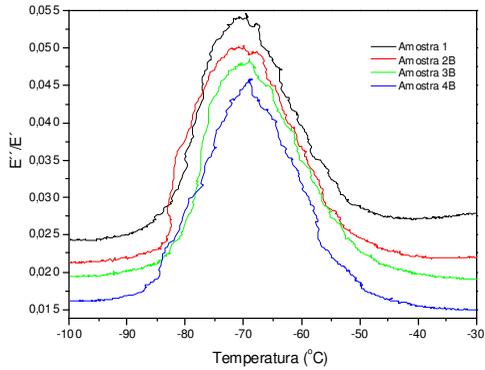
Para as misturas contendo ABS virgem/material reprocessado (90/10) (m/m), (amostras 2B, 3B e 4B) pode-se notar uma redução do fator de amortecimento (intensidade do  $\text{Log } E''/E'$ ) para a fase elastomérica, enquanto que não é observada variação deste fator para a fase de SAN. A redução da tangente de perda na  $T_g$  do butadieno indica que à medida que é adicionado material reprocessado ao ABS virgem há um aumento da rigidez da fase de butadieno, provavelmente devido à formação de ligações cruzadas desta fase, corroborando assim com os resultados de FTIR. Nota-se que este efeito é mais pronunciado para as

misturas que contém o material processado 4 vezes (Amostra 4B), indicando que o reprocessamento induz um aumento da degradação da fase elastomérica do material.

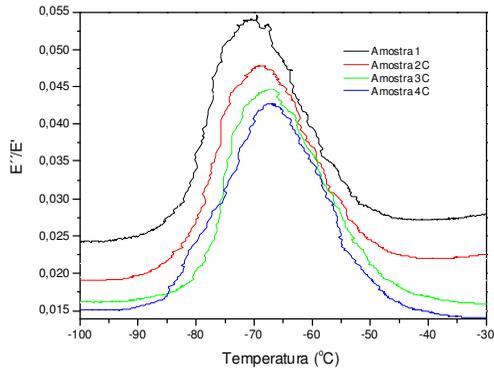


**Figura 21: Curvas de Log (E''/E') em função da temperatura para corpos-de-prova envelhecidos termicamente e UV (Amostras reprocessadas 2B, 3B, 4B e processada uma vez (Amostra 1)).**

A Figura 22 apresenta as variações dos fatores de amortecimento em função da temperatura para a amostra 1 (referência), misturas de ABS virgem com 10% e 20 % em massa de material envelhecido termicamente e por ataque UV, respectivamente.



(a)



(b)

**Figura 22: Curvas de tangente de perda ( $E''/E'$ ) em função da temperatura para misturas de ABS virgem/ABS envelhecido termicamente em concentrações de: a) 90/10 (m/m) e b) 80/20 (m/m). A Amostra 1 é a amostra de ABS não envelhecida.**

Com o auxílio da Tabela 6: Temperatura de transição vítrea e fator de amortecimento para o ABS e misturas de ABS virgem/ABS envelhecido termicamente., observa-se que a adição de maior quantidade de material envelhecido reduz o fator de amortecimento significativamente do ABS (12 a 24 % de redução) e desloca a sua tangente de perda para maiores temperaturas de  $-71$  para  $-66^{\circ}\text{C}$ .

Entretanto, pode-se notar que as misturas com 10 % em massa de material reciclado não há aumento significativo da Tg e a redução da intensidade de Tan delta varia de 7 a 17 % quando comparadas com a Amostra 1.

Comparando os valores de módulo de armazenamento das misturas de ABS virgem/ABS envelhecido (90/10) com a Amostra 1 à temperatura de 25°C, nota-se um aumento de 2,5% para a amostra 2B e 7% para a amostra 4B. Pode-se notar para as amostras 2B e 4B uma redução do módulo de perda de 3 e 28 %, respectivamente, quando comparadas com a referência (Amostra 1). Isto é um indicativo de que a mobilidade das cadeias estará mais restrita com o aumento da degradação térmica das amostras.

Por outro lado, comparando-se as misturas 2C e 4C (misturas de ABS virgem/ABS envelhecido (80/20)) com a amostra de referência, observa-se um aumento maior dos valores de módulo de armazenamento de 5,5 até 12 %, respectivamente, enquanto que para estas mesmas amostras os valores de módulo de perda são 5 e 34 % menores.

**Tabela 6: Temperatura de transição vítrea e fator de amortecimento para o ABS e misturas de ABS virgem/ABS envelhecido termicamente.**

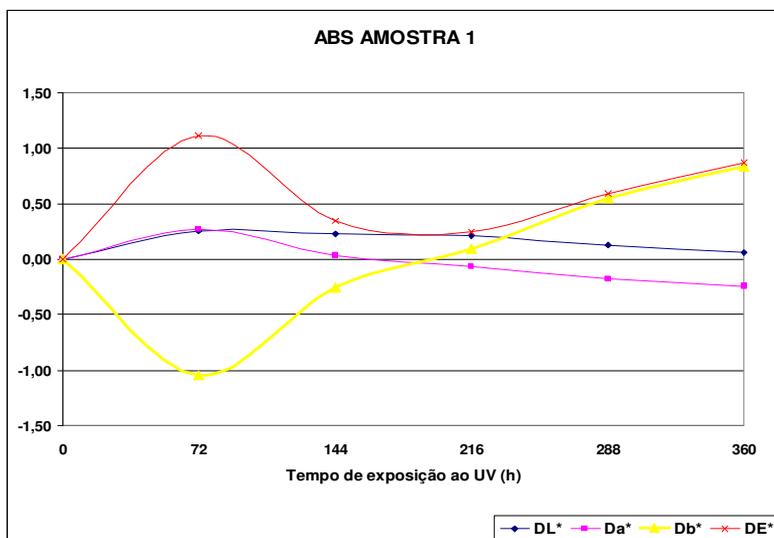
Amostra	ABS reciclado % em massa	Tg (°C)	Fator de amortecimento E''/E' (Tg)	E' 25oC (GPa)	E'' 25oC (MPa)
1	0	-71	0,054	1,90	57,24
2B	10	-71	0,050	1,95	55,41
3B	10	-70	0,048	2,02	47,60
4B	10	-70	0,045	2,04	41,30
2C	20	-68	0,047	2,00	53,98
3C	20	-67	0,043	2,09	44,73
4C	20	-66	0,041	2,17	37,52

### 6.3 COLORIMETRIA

O ensaio de colorimetria foi realizado para avaliação do amarelecimento do material, propriedade limitante para aplicação do ABS em peças estéticas que não envolvem pintura e expõe o material a agentes degradativos como luz (artificial ou natural), agentes químicos

(óleos ou ácidos graxos, por exemplo) ou mesmo em aplicações de tensionamento constante.

O ensaio gera três diferentes informações relativas à cor da amostra. O DL informa a variação de luminosidade da amostra, quando DL é maior que zero indica que a luminosidade da amostra aumenta e quando DL menor que zero a amostra terá menor luminosidade. O Da gera informação de variação das cores verde e vermelha, quando Da é maior que zero a amostra tem coloração mais esverdeada e quando menor que zero tem coloração mais avermelhada. Já o Db apresenta a variação entre a cor azul e âmbar, sendo que quando Db é menor que zero a amostra terá maior coloração azul e quando maior que zero a amostra terá coloração amarelada. A Figura 23 apresenta o comportamento das três escalas de uma amostra de material virgem moldada por injeção (amostra 1) para a evolução do ensaio de envelhecimento.

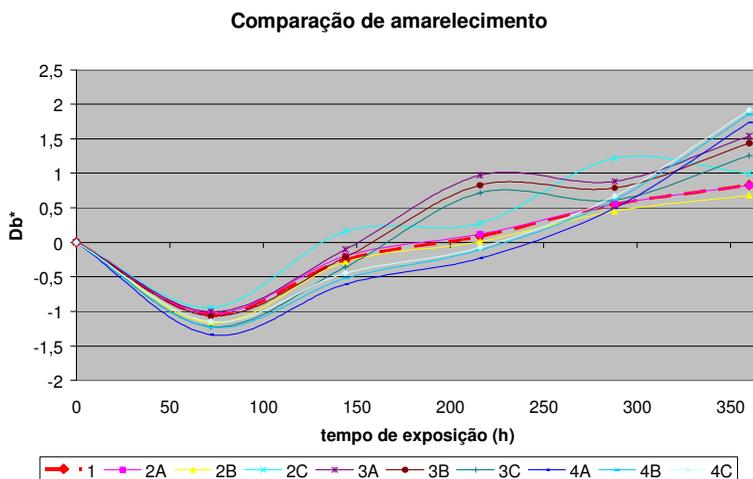


**Figura 23: Evolução de envelhecimento da amostra 1 de ABS.**

A informação dada pelo DE indicado na Figura 23 é a média dos módulos de DL, Da e Db ( $DE = \sqrt{Da^2 + Db^2 + DL^2}$ ). Sabe-se que, com a evolução do envelhecimento, o ABS ganha maior destaque na coloração amarela, pela formação de compostos cromóforos gerados principalmente na quebra da ligação dupla da fase elastomérica.

Portanto, para este trabalho visou-se principalmente a evolução de Db que rege esta cor.

Com a inclusão de material reciclado com diferentes históricos térmicos esperava-se um aumento no índice de amarelecimento das amostras, entendendo que a proporção de material reutilizado pode acelerar ou intensificar este fator da degradação do ABS e outros materiais plásticos da família dos estirênicos. A Figura 24 mostra o comportamento de amarelecimento ao longo das diferentes amostras.

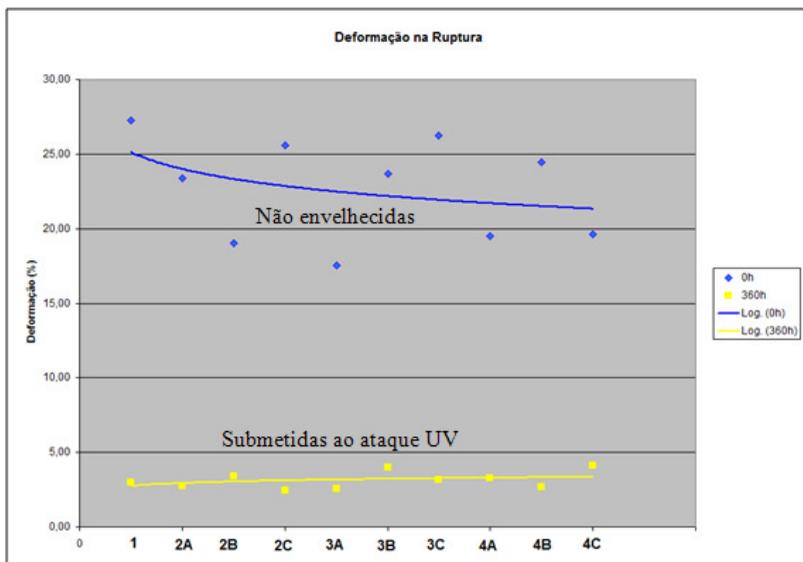


**Figura 24: Índice de amarelecimento das amostras de ABS com incorporação de material reprocessado.**

Este gráfico mostra um aumento do índice de acordo tanto com o aumento do percentual de material reprocessado quanto no aumento do histórico térmico do mesmo. Pode-se observar que as amostras 2A e 2B têm comportamentos iguais ou até melhores do que a amostra 1 que possui 100% de resina virgem. Isto pode ser interpretado como um bom indicativo para baixa contribuição do material reciclado para estes percentuais de incorporação e este histórico térmico. Até a amostra 2C indica um leve aumento no índice, que pode ser considerado um incremento baixo deste índice (de 0,0831 para 0,0997 Db).

#### 6.4. Ensaio de Resistência a Tração

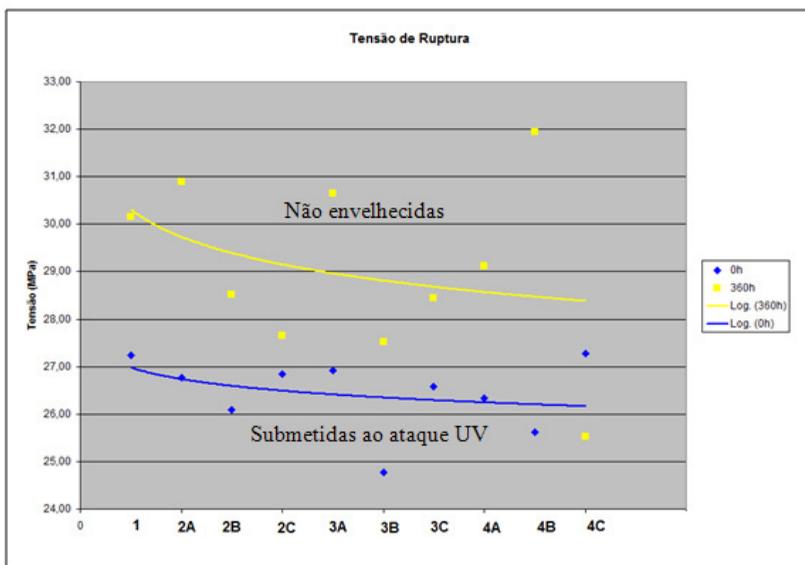
A Figura 25 e a Figura 26 mostram o comportamento da Deformação na Ruptura e da Tensão de Ruptura em função do percentual de material reprocessado envelhecido com ataque UV ou não, incorporado ao ABS virgem.



**Figura 25: Resultado de Deformação na ruptura para teste de resistência a tração.**

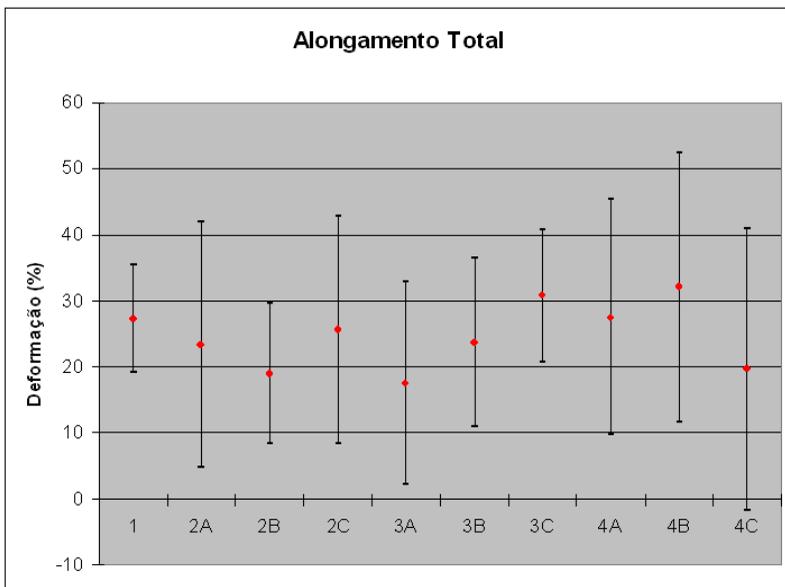
Notou-se que a propriedade de Deformação total foi bastante afetada em termos de retenção de propriedades, perdendo de 79% a 92% das propriedades sem a fotodegradação. Esta propriedade basicamente é regida pela presença de material elastomérico, que propicia ao polímero mobilidade molecular mesmo a temperaturas baixas, como a temperatura ambiente. Com o aumento de ligações cruzadas nesta fase, esta movimentação fica comprometida, conseqüentemente conferindo ao polímero um comportamento mais frágil do que a resina em condição natural. As demais fases do ABS têm maior resistência aos mecanismos de degradação em geral, contribuindo muito pouco com as alterações das características mecânicas do material, ainda mais quando comparado em ensaios mecânicos como o de resistência a tração, que tem caráter de informação em âmbito macroscópico, dificilmente indicando alterações de comportamentos simultâneos das fases envolvidas no polímero.

A Tensão de Ruptura é a segunda informação avaliada para este ensaio e tem como intuito avaliar o comportamento evolutivo de deformação elástica ao longo da incorporação de material reciclado em diferentes históricos térmicos do material. Pode-se indicar algum tipo de evolução ou mudança nas fases do terpolímero, aqui de uma maneira mais genérica, podendo ser atribuído a todas as fases e não apenas a fase elastomérica. A Figura abaixo apresenta o gráfico de evolução da Tensão de Ruptura em função das diferentes amostras testadas.



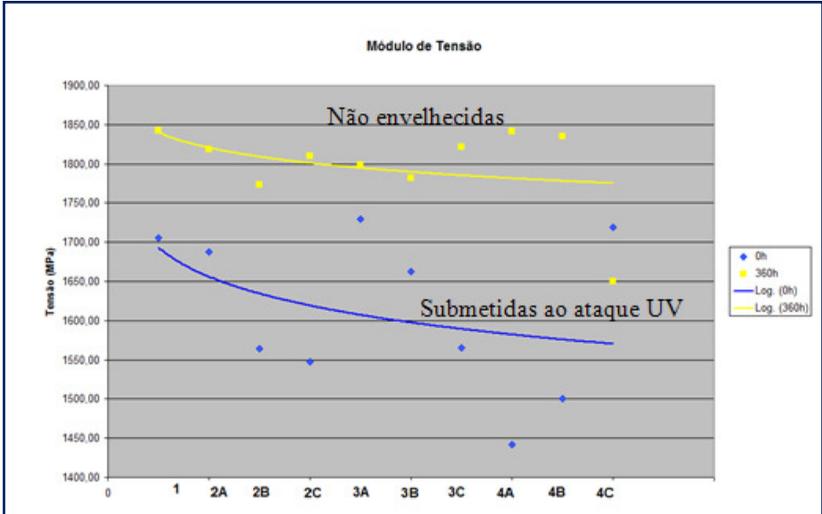
**Figura 26: Resultado de Tensão de Ruptura para teste de resistência a tração.**

O comportamento não-linear das propriedades para o ensaio de resistência a tração pode ser atribuído a diferentes causas, principalmente a presença de vazios nos corpos-de-prova de tração, o que afetou de maneira significativa os resultados. Esta grande variação pode ser constatada na figura abaixo que apresenta o desvio padrão encontrado para a curva de Alongamento total sem ataque UV.



**Figura 27: Desvio padrão da curva de Alongamento Total sem ataque UV.**

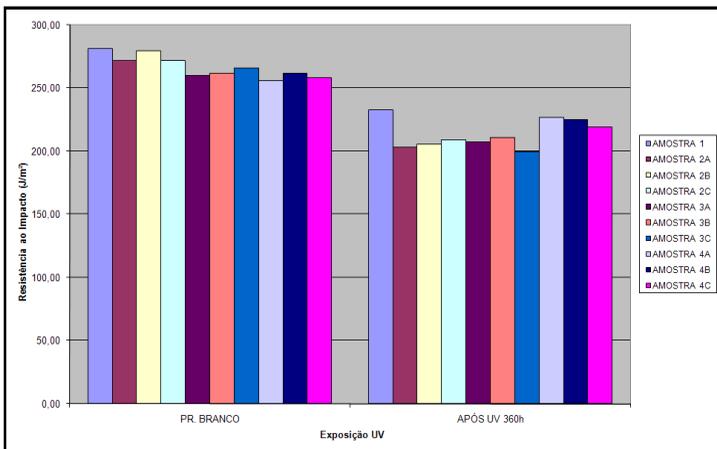
Nota-se (Figura 28) um aumento do módulo de elasticidade para as amostras atacadas com raios UV. Este fato era esperado, uma vez que a degradação induz um aumento da rigidez do material que pode ser atribuído à formação de ligações cruzadas, conforme constatado no ensaio dinâmico mecânico.



**Figura 28: Evolução do Módulo de Tensão para as diferentes amostras.**

### 6.5 Ensaio de Resistência ao impacto

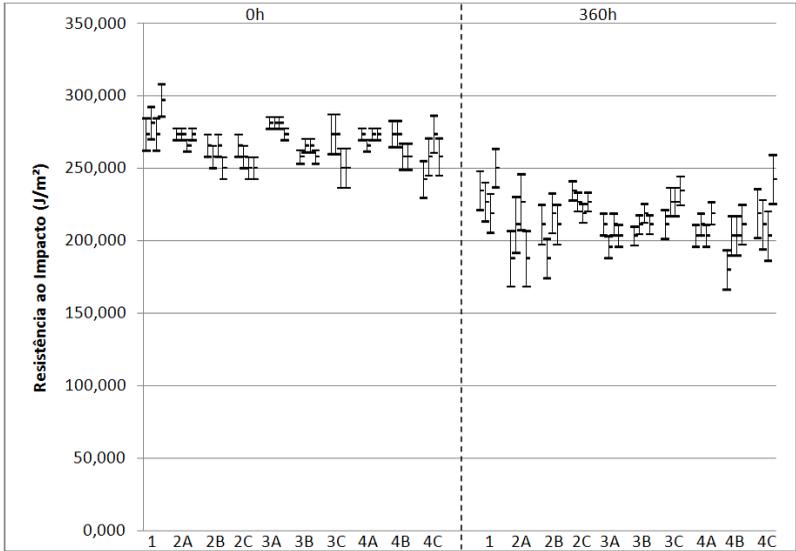
A Figura 29 apresenta os resultados do ensaio de Resistência ao Impacto para verificação de forma ampla sua alteração em relação à adição de material reprocessado.



**Figura 29: Tabela de Resistência ao Impacto**

A diminuição de resistência ao impacto para as amostras envelhecidas termicamente e por ataque UV indica, mesmo que de maneira superficial, uma redução na tenacidade do polímero, certamente sendo a fase elastomérica a principal responsável. Devido à formação de ligações cruzadas que reduzem a mobilidade molecular, conseqüentemente diminuindo sua capacidade de absorver energia até a sua ruptura. Esta mudança é ainda mais perceptível após a submissão das amostras ao ensaio de envelhecimento acelerado (ataque UV), sendo mais significativo para as amostras com adição de material reciclado. Essas amostras apresentam uma pequena queda na resistência ao impacto quando comparado a amostra 1 envelhecida. Para uma analogia de aplicação, as amostras com material reciclado incorporado deveriam ser direcionadas para peças de menor exigência mecânica, aqui com exigências de aproximadamente 9% (comparação com a amostra 4A) menores que quando utilizado a resina 100% virgem. Apesar da queda desta propriedade, o material ainda pode ser utilizado em aplicações com exigência muito superior ao Poliestireno de Alto Impacto (PSAI), por exemplo, já que esta propriedade gira em torno de 50 a 150 J/m<sup>2</sup>.

Para este teste mecânico, o desvio padrão encontrado foi menor do que os ensaios de resistência a tração, o que dá maior representatividade ao ensaio auxiliando no entendimento da influência da degradação do ABS, conforme indicado na Figura 30. Os resultados indicam que, mesmo considerando a variação dos testes, a linha de tendência indica a redução das propriedades mecânicas.



**Figura 30: Desvio padrão para o ensaio de Resistência ao Impacto**

## CONCLUSÃO

As misturas de ABS virgem com material reprocessado utilizadas neste trabalho apresentaram mudanças nos valores de propriedades mecânicas e dinâmico-mecânicas quando comparadas ao ABS não reciclado. Entretanto, estas variações de propriedades podem não ser significativas para o uso de acordo com as necessidades do produto final e sua determinada aplicação, tornando possível a viabilidade de reciclagem primária.

As análises de Espectroscopia no Infravermelho puderam indicar qualitativamente a evolução da degradação do ABS em função do percentual de material reprocessado incorporado à resina virgem. Pôde-se evidenciar que a insaturação do butadieno é reduzida com o aumento da degradação térmica e fotooxidativa do material. Esta técnica, apesar de prover informações confiáveis e conclusivas, não poderia ser adotada para avaliação isolada por gerar informações qualitativas que são variáveis em função da espessura da amostra, bem como resultante do espalhamento da luz incidente, já que esta pode variar de acordo com a conformação da amostra.

Os resultados obtidos pelo DMA evidenciaram que a fase de butadieno sofreu alterações sugerindo principalmente a formação de ligações cruzadas, as quais puderam ser comprovadas a partir do aumento do módulo de armazenamento e redução do fator de amortecimento. Estas constatações corroboraram com as informações obtidas pelo infravermelho, já que estas técnicas mostraram-se mais sensíveis para prover informações quanto a degradação do material.

No ensaio de colorimetria pôde-se constatar que, utilizando uma escala de aprovação de produto baseado em valores máximos de Db (variação entre as cores azul e âmbar) em 1,5, grande parte das misturas confeccionadas seriam viáveis – até a amostra 3C (mistura de resina virgem com 20% de material reprocessado duas vezes) – para aplicação final de produtos de mesmo valor agregado quando comparados com a resina não reciclada. O desvio comparado a amostra 1 (processado uma vez) foi relativamente pequeno. Esta conclusão tem grande relevância, considerando que o amarelecimento é um assunto amplamente discutido em estudos científicos e sendo fator limitante para a aplicação do ABS como material reutilizado.

Para os ensaios mecânicos estas constatações não foram significativamente consistentes e, principalmente, não apresentaram informações conclusivas sobre as variações de concentração de material reprocessado. Dificuldades inerentes destas técnicas como, dependência

das amostras, operador, equipamento e material foram destacadas influenciando nas propriedades, resultando em um grande desvio padrão. Apesar destes fatores, estas técnicas indicaram uma tendência na degradação do material em função do aumento da concentração de material reciclado.

Visando a viabilidade da aplicação de material reprocessado com fins de reciclagem primária, utilizando as técnicas de Infravermelho, DMA, Colorimetria e Ensaio Mecânico pôde-se concluir que seria possível a indicação de aplicação de 5 a 10% de material reprocessado para grande parte das peças técnicas utilizadas nas indústrias automobilísticas e de eletrodomésticos, sem afetar de maneira significativa o amarelecimento e propriedades mecânicas do material. Ainda seria possível a utilização deste material reprocessado em percentuais maiores dependendo das exigências para os produtos finais desejados de menor valor agregado com base nas informações de DMA, onde a queda das propriedades reduz de maneira aproximadamente linear para  $E'$ . Este comportamento indica que, dependendo das exigências finais da peça, um fator limitante seria o processamento ou variação das propriedades reológicas do material em função do reprocessamento e do percentual de material reprocessado aplicado à mistura.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- 1- Estudo das propriedades reológicas e de processamento das misturas contendo diferentes concentrações e sua influência no processamento do ABS.
- 2- Avaliação das propriedades Dinâmico-Mecânicas e análise de Infravermelho das amostras de envelhecidas termicamente (diferentes históricos térmicos) e suas respectivas misturas com a matéria-prima virgem.
- 3- Estudo da evolução da degradação térmica e fotooxidativa através da técnica de Espectrometria Fotoeletrônica de Raios-X.
- 4- Estudo da mudança da massa molar do ABS de acordo com a evolução degradativa quando submetido à degradação térmica e fotooxidativa por Cromatografia de exclusão por tamanho (SEC).
- 5- Avaliação da influência da dinâmica de reticulação da borracha durante o processo degradativo do ABS.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] [HTTP://WWW.ANBA.COM.BR/](http://www.anba.com.br/). Acessado em 02/05/2007 às 18:20
- [2] [HTTP://WWW.RECICLAVEIS.COM.BR/](http://www.reciclaveis.com.br/). Acessado em 02/05/2007 às 18:30
- [3] [HTTP://WWW.INTRAPLAS.PT/APRENDER/RECICLAGEM.ASP](http://www.intraplas.pt/aprender/reciclagem.asp). Acessado em 02/05/2007 às 18:40.
- [4] [HTTP://WWW.COMPAM.COM.BR](http://www.compam.com.br). Acessado em 02/05/2007 às 18:50.
- [5] [HTTP://WWW.CIBA.COM](http://www.ciba.com). Acessado em 05/06/2008 às 18:30.
- [6] Mano, E., Mendes, “Introdução a Polímeros”, Edgard Blücher, 1999
- [7] Brydson, J, “Plastics Materials.”, British Library, 1999.
- [8] Zweifel, H., “Stabilization of Polymeric Materials”, Springer, 1998.
- [9] Rabello, M., “Aditivação de Polímeros”, São Paulo, Artliber, 2000.
- [10] Canevarolo Jr, S., “Ciência dos Polímeros: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros”, São Paulo, Artliber, 2002.
- [11] Davis, A., Sims, D. “Weathering of Polymers”, London Applied Science, 1999.
- [12] Calliester Jr, W. D., “Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução”, LTC, 2002.
- [13] Sanchez, E. M. S, Ferreira, M. M. C., Felisberti, “Avaliação da Degradação Térmica e Fotooxidativa do ABS Automotivo”, Polímeros: Ciência e Tecnologia, 116-122, 1999.
- [14] Blom, H., Yeh, R., Wojnarowsky, R., Ling, M., “Detection of Degradation of ABS Materials via DSC”, Polymer Degradation and Stability, 64-66, 2006.
- [15] Boldizar, A., Möller, K., “ Degradation of ABS during repeated processing and accelerated aging”. 2003, Science Direct, 259-266, 2003
- [16] Tiganis, B. E., Burn, L.S., Hill, A. J., “Thermal degradation of Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) blends”, Polymer Degradation and Stability, 425-434, 2002.
- [17] Suzuki, M., Wilkie, C., “The thermal degradation of acrylonitrile-butadiene-styrene terpolymer as studied by TGA/FTIR”, Polymer Degradation and Stability, 217-221, 1994.
- [18] Davis, P., Tiganis, B.E., Burn, L.S., “The effect of photo-oxidative degradation on fracture in ABS pipe resins.”, Polymer Degradation and Stability, 233-242, 2003.
- [19] Piton, M., Rivaton, A., “Photo-oxidation of ABS at long wavelengths ( $\lambda > 300\text{nm}$ )”, Polymer Degradation and Stability, 147-157, 1996.
- [20] Arostegui, A., Sarrionandia, M., Aurrekoetxea, J., Urrutibeascoa, I., “Effect of dissolution-based recycling on degradation and the

- mechanical properties of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene copolymer.”, *Polymer Degradation and Stability*, 1-7, 2006.
- [21] Saron, Dissertação de Mestrado, “Estudo da degradação térmica e fotoquímica das blendas PPO/HIPS”, UNICAMP, Campinas, SP, 2001.
- [22] Sanchez, E. M. S, Ferreira, M. M. C., Felisberti, M. I., Costa, C. A. R, Galembeck, F., “Avaliação da degradação térmica e fotooxidativa para fins de reciclagem.”, *CBPol*, 1565-1571, 2003.
- [23] Paoli, M. A., “Degradação e Estabilização de Polímeros.”, *Chemkeys*, 2008.
- [24] Porcel, F. S., Dissertação de Mestrado, “Influência dos parâmetros de processamento e da composição na morfologia de resinas de ABS”, UFSCar, São Carlos, SP, 2004.

# ANEXO I



**GE Plastics**

**CYCOLAC® GPM5600**

Americas: LIMITED USE

ABS Resin

General purpose. Excellent flow/impact.

TYPICAL PROPERTIES <sup>1</sup>	TYPICAL VALUE	UNIT	STANDARD
<b>MECHANICAL</b>			
Tensile Str. yld, Type I, 5 mm/min	38	MPa	ASTM D 638
Tensile Modulus, 5 mm/min	2070	MPa	ASTM D 638
Flex Stress, yld, 1.3 mm/min, 50 mm span	69	MPa	ASTM D 790
Flex Mod, 1.3 mm/min, 50 mm span	2140	MPa	ASTM D 790
Hardness, Rockwell R	105	-	ASTM D 785
<b>IMPACT</b>			
Izod Impact, notched, 23°C	347	J/m	ASTM D 256
<b>THERMAL</b>			
HDT, 1.84 MPa, 3.2mm, unannealed	80	°C	ASTM D 648
HDT, 0.45 MPa, 6.4 mm, unannealed	95	°C	ASTM D 648
HDT, 1.82 MPa, 6.4 mm, unannealed	83	°C	ASTM D 648
Relative Temp Index, Elec	60	°C	UL 740B
Relative Temp Index, Mech w/impact	60	°C	UL 740B
Relative Temp Index, Mech w/o impact	60	°C	UL 740B
<b>PHYSICAL</b>			
Specific Gravity	1.03	-	ASTM D 792
Mold Shrinkage, flow, 3.2 mm	0.5 - 0.8	%	ASTM D 955
Melt Flow Rate, 230°C/3.5 kgf	8	g/10 min	ASTM D 1238
Melt Viscosity, 280°C, 1000 sec-1	1450	poise	ASTM D 3825
<b>ELECTRICAL</b>			
Arc Resistance, Tungsten (PLC)	6	PLC Code	ASTM D 495
Hot Wire Ignition (PLC)	3	PLC Code	UL 746A
High Voltage Arc Track Rate (PLC)	3	PLC Code	UL 746A
High Ampere Arc Ign. surface (PLC)	0	PLC Code	UL 746A
Comparative Tracking Index (UL) (PLC)	0	PLC Code	UL 746A
<b>FLAME CHARACTERISTICS</b>			
UL Recognized, 94HB Flame Class Rating (3)	1.5	mm	UL 94
CSA (See File for complete listing)	LS8848D	File No.	CSA LISTED
Oxygen Index (LOI)	19	%	ASTM D 2863
UV-light, water exposure/immersion	F2	-	UL 746C

<sup>1</sup> Typical values only. Variations within normal tolerances are possible for various colours. All values are measured at least after 40 hours storage at 23°C/50% relative humidity. All properties, except the melt volume rate are measured on injection moulded samples. All samples are prepared according to ISO 242.

<sup>2</sup> Only typical data for material selection purposes that to be used for part or tool design.  
<sup>3</sup> This table is not intended to reflect health hazards presented by this or any other material under actual use conditions.  
<sup>4</sup> Own measurement according to UL.

Source: GMD, Last Update: 11/13/2001

Page 1

PLEASE CONTACT YOUR LOCAL SALES OFFICE FOR AVAILABILITY IN YOUR AREA. DISCLAIMER: THE MATERIALS AND PRODUCTS OF THE BUSINESSES MAKING UP THE GE PLASTICS UNIT OF GENERAL ELECTRIC COMPANY, ITS SUBSIDIARIES AND AFFILIATES ("GE"), ARE SOLD SUBJECT TO GE'S STANDARD CONDITIONS OF SALE, WHICH ARE INCLUDED IN THE APPLICABLE DISTRIBUTOR OR OTHER SALES AGREEMENT, PRINTED ON THE BACK OF ORDER FORMS, ORDERS AND INVOICES, AND AVAILABLE UPON REQUEST. ALTHOUGH ANY INFORMATION, RECOMMENDATIONS OR ADVICE CONTAINED HEREIN IS GIVEN IN GOOD FAITH, GE MAKES NO WARRANTY OR GUARANTEE, EXPRESS OR IMPLIED, IN THAT THE RESULTS DESCRIBED HEREIN WILL BE OBTAINED UNDER EXACTLY THE SAME CONDITIONS, OR IN AS TO THE EFFECTIVENESS OR SAFETY OF ANY DESIGN INCORPORATING GE'S MATERIALS, PRODUCTS, RECOMMENDATIONS OR ADVICE. EXCEPT AS PROVIDED IN GE'S STANDARD CONDITIONS OF SALE, GE AND ITS REPRESENTATIVES SHALL IN NO EVENT BE RESPONSIBLE FOR ANY LOSS RESULTING FROM ANY USE OF ITS MATERIALS OR PRODUCTS DESCRIBED HEREIN. Each user shall be responsible for making its own determination as to the suitability of GE's materials, products, recommendations or advice for its own particular use. Each user shall identify and protect all data and drawings necessary to fabricate the finished parts incorporating GE's materials or products. All parts and designs for use under license conditions. Nothing in this or any other document, in any form, recommendation or advice, shall be deemed to alter, vary, supersede, or waive any provision of GE's Standard Conditions of Sale or this Disclaimer, unless any such modification is specifically agreed to in writing signed by GE. No authorized customer benefit concerning availability or suggested use of any material, product or design is intended, or shall be construed, to grant any license under any patent or other intellectual property right of General Electric Company or any of its subsidiaries or affiliates covering such use or design, or as a recommendation for the use of such material, product or design to the infringement of any patent or other intellectual property right.

© CYCOLAC is a registered trademark of the General Electric Company.  
 © 1997-2002 General Electric Company. All rights reserved.



PROCESSING PARAMETERS	TYPICAL VALUE	UNIT
<b>Injection Molding</b>		
Drying Temperature	80 - 95	°C
Drying Time	2 - 4	hrs
Drying Time (Cumulative)	8	hrs
Maximum Moisture Content	0.01	%
Melt Temperature	220 - 280	°C
Nozzle Temperature	220 - 280	°C
Front - Zone 3 Temperature	215 - 240	°C
Middle - Zone 2 Temperature	205 - 225	°C
Rear - Zone 1 Temperature	190 - 210	°C
Mold Temperature	50 - 70	°C
Back Pressure	0.3 - 0.7	MPa
Screw Speed	30 - 60	rpm
Shot to Cylinder Size	50 - 70	%
Vent Depth	0.038 - 0.051	mm

1) Typical values only. Variations within normal tolerances are possible for various colors. All values are required at least 48 hrs in storage at 22°C/50% relative humidity.  
All properties, except the melt volume rate are measured on injection-molded samples.  
All samples are prepared according to ISO 124.

2) Only typical data for material selection purposes. Not to be used for part or tool design.  
3) This table is not intended to reflect results presented by this or any other material under actual conditions.  
4) Own measurement according to UL.

Source: GMD, Last Update: 11/13/2001

Page 2

PLEASE CONTACT YOUR LOCAL SALES OFFICE FOR AVAILABILITY IN YOUR AREA. DISCLAIMER: THE MATERIALS AND PRODUCTS OF THE BUSINESSES MAKING UP THE GE PLASTICS UNIT OF GENERAL ELECTRIC COMPANY, ITS SUBSIDIARIES AND AFFILIATES (GEP), ARE SOLD SUBJECT TO GEP'S STANDARD CONDITIONS OF SALE, WHICH ARE INCLUDED IN THE APPLICABLE DISTRIBUTOR OR OTHER SALES AGREEMENT, PRINTED ON THE BACK OF ORDER ACKNOWLEDGEMENT AND INVOICE, AND AVAILABLE UPON REQUEST. ALTHOUGH ANY INFORMATION, RECOMMENDATION, TOOL OR ADVICE CONTAINED HEREIN IS GIVEN IN GOOD FAITH, GEP MAKES NO WARRANTY OR GUARANTEE, EXPRESS OR IMPLIED, IN THAT THE RESULTS DESCRIBED ABOVE WILL BE OBTAINED UNDER EXACTLY THE SAME CONDITIONS, OR AS TO THE EFFECTIVENESS OR SAFETY OF ANY DESIGN INCORPORATING SUCH PRODUCTS, RECOMMENDATIONS OR ADVICE. GEP PROVIDES GEP'S STANDARD CONDITIONS OF SALE, GEP AND ITS REPRESENTATIVES SHALL IN NO EVENT BE RESPONSIBLE FOR ANY LOSS RESULTING FROM ANY USE OF ITS MATERIALS OR PRODUCTS DESCRIBED HEREIN. Each user bears the responsibility for making its own determination as to the suitability of GEP's materials, products, recommendations, or advice for its own particular use. Each user should identify and perform all tests and analyses necessary to ensure that its components incorporating GEP materials or products will be safe and suitable for use under actual conditions. Nothing in this or any other document, nor any oral representation or advice, shall be deemed to alter, vary, supersede, or waive any provision of GEP's Standard Conditions of Sale or this disclaimer, unless any such modification is in specifically signed-in writing signed by GEP. No statement contained herein concerning a possible or suggested use of any material, product or design is intended, or should be construed, to grant any license under any patent or other intellectual property right of General Electric Company or any of its subsidiaries or affiliates covering such use or design, or as a recommendation for the use of such material, product or design to the infringement of any patent or other intellectual property right.

© CYCOLAC is a registered trademark of the General Electric Company.

© 1997-2003 General Electric Company. All rights reserved.