

**Contribuição ao Estudo de Reciclagem de Policarbonato  
advindo de apreensão de Óculos pela Polícia Federal**

**Natália Isabel Malüe Vieira**

160185

**Orientador: Dr. Wilson Kindlein Junior**



**NATALIA ISABEL MALÛE VIEIRA**

**RECICLAGEM DE POLICARBONATO**

**ADVINDO DE APREENSÃO DA POLICIA FEDERAL**

Trabalho de Conclusão de Curso para a obtenção  
do grau de Engenheira de Materiais, pela  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul –  
UFRGS

Prof. Dr. Wilson Kindlein Junior  
Orientador

Msc. Elisa G. Ashton  
Co- Orientadora

Porto Alegre, dezembro de 2014

---

“Cada pessoa deve trabalhar para o seu aperfeiçoamento e, ao mesmo tempo, participar da responsabilidade coletiva para toda a Humanidade.”

Marie Curie

---

## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Elisa Ashton por ter me acolhido no seu projeto.

A colega Vivian e à colega Cecilia por ajudarem na análise de FTIR.

À colega Analice pela prontidão e disposição.

A Professora Raquel Mauler, coordenadora do LPA, e aos colegas do LPA, Charon, Luana e

Tales por cedência do equipamento e auxílio no uso destes.

A Viviane e Ezequiel do CETEPO por prontamente ajudarem na resolução de alguns problemas de processamento e fazer o processamento propriamente dito.

Ao Jorge Cândido pelas análises químicas alternativas, empolgação e incentivo.

## **Resumo**

Grande quantidade de resíduos poliméricos é gerada diariamente a partir de processos industriais, empresas de serviços e atividades urbanas. No intuito de reaproveitar parte destes resíduos, a reciclagem mecânica torna-se uma alternativa atraente. O Presente trabalho visou à reciclagem de um material polimérico baseado em resíduos gerados pela apreensão de óculos falsos pela Polícia Federal. Tal material, composto predominantemente de Policarbonato foi reprocessado por injeção em conjunto com policarbonato virgem na proporção de 50% de cada. Em seguida ensaios mecânicos foram feitos para determinar suas novas propriedades. Foram avaliadas as seguintes propriedades: densidade, resistência à tração, módulo de elasticidade, trabalhabilidade e resistência ao impacto. Os dados obtidos foram utilizados para alimentar o software CES 2013© e o comparar com materiais com propriedades mecânicas semelhantes passíveis de substituição pelo Policarbonato Reciclado 50%. Após análise dos resultados, percebeu-se diminuição das propriedades mecânicas, dificuldades de processabilidade, êxito no processo de reciclagem e possibilidades de aplicação na substituição de outros materiais existentes no mercado.

## Sumário

Agradecimentos .....	iii
Resumo.....	iv
Lista de figuras.....	iii
Lista de tabelas e quadros.....	v
1. Introdução .....	1
2. Revisão Bibliográfica .....	4
2.1. Reciclagem de polímeros .....	4
2.2. Policarbonato .....	7
2.3. A Problemática dos óculos falsificados.....	10
2.4. Óculos e materiais.....	12
2.5. Seleção de materiais e Reciclagem .....	14
3. Procedimento Experimental .....	15
3.1. Recepção dos óculos apreendidos.....	15
3.2. Desembalagem /Desmontagem .....	16
3.3. Trituração.....	17
3.4. Análise Espectroscopia por Infra Vermelho com Transformada de Fourier .....	19
3.5. Reprocessamento – Injeção.....	20
3.6. Ensaio de Tração .....	26

3.7.	Ensaio de Impacto .....	28
3.8.	Software CES.....	30
4.	Resultados e discussão .....	32
4.1.	Análise química.....	32
4.2.	Procedimento de injeção.....	33
4.3.	Ensaio mecânicos .....	34
4.4.	Comparação.....	38
5.	Conclusão.....	41
6.	Sugestão de trabalhos futuros.....	42
7.	Bibliografia .....	43
8.	Anexos.....	47



## Lista de figuras

Figura 1: Representação do ciclo dos produtos poliméricos pós-consumo. Adaptado de (Zanin, 2004).....	6
Figura 2: Representação da estrutura química do mero do Policarbonato (Canevarolo, Ciência dos Polimeros, um texto basico para tecnólogos e engenheiros, 2010). .....	7
Figura 3: Apreensão de óculos falsos em São Paulo (G1, 2013). .....	11
Figura 4: Exemplo dos componentes de óculos comum (Smart Oculos).....	13
Figura 5: Óculos recebido da PF pelo LdSM .....	14
Figura 6: Evolução dos Materiais de Engenharia com o Tempo; Adaptado de (Ashby, MAterials and Design - The Art and Science of Material Selection in Product Design, 2010). .....	15
Figura 7: óculos como apreendidos pela PF.....	16
Figura 8: Primeira etapa de separação .....	17
Figura 9: Moinho SEIBT de facas rotativo do LPA/IQ.....	17
Figura 10: "Flakes" obtidos apo's moagem.....	18
Figura 11: Equipamento de secagem do CETEPO .....	19
Figura 12: FTIR do LdSM .....	20
Figura 13: Modelo de Corpo de Prova para ensaio de tração determinado pela ASTM D638 .....	21
Figura 15: Injetora Bottenfeld do LPA.....	22
Figura 16: Corpos de Prova para tração obtidos na injetora do LPA .....	24
Figura 17: Injetora Battenfeld do CETEPO, visão da lateral da rosca reciproca. ....	25

Figura 18: Injetora Battenfeld do CETEPO, visão do molde de injeção e painel de controle. .....	25
Figura 19: corpos de prova para tração obtidos por injeção no CETEPO .....	27
Figura 21: Máquina de ensaio de impactos Isatron .....	29
Figura 22: Corpos de prova para ensaio de impacto injetados no CETEPO. ....	30
Figura 24: Espectro de FTIR da armação do óculos. ....	32
Figura 25: Corpos de prova após Ensaio de Tração .....	35
Figura 26: Gráfico obtido com o Software CES .....	39

## **Lista de tabelas e quadros**

Tabela 1 Algumas propriedades do Policarbonato .....	8
Tabela 2: Parâmetros iniciais de Injeção no LPA-IQ.....	22
Tabela 3: Parâmetros finais de processamento no LPA.....	23
Tabela 4: Parâmetros finais de injeção feita no CETEPO .....	26
Tabela 5: Resultado ensaio de Tração do Policarbonato reciclado 50% .....	35
Tabela 6: Resultado recalculado sem o Corpo de Prova 9.....	36
Tabela 7: comparação dos dados obtidos por tração do PC Reciclado com os do PC virgem do programa CES .....	37
Tabela 8: Dados obtidos através do Ensaio de Impacto Izod.....	37
Tabela 9: Materiais passíveis de substituição pelo Policarbonato Reciclado 50% em relação às propriedades mecânicas .....	39



## **1. Introdução**

Os Plásticos, como são popularmente conhecidos os materiais poliméricos termoplásticos sintéticos, sofreram no pós-guerra uma evolução espetacular, tanto nas propriedades e características que apresentam, quanto nas inúmeras aplicações que encontram na vida diária. (Zanin, 2004)

Sua baixa densidade, resistência, facilidade de produção, capacidade de fabricação, longa vida, leveza e baixo custo são os fatores responsáveis por esse fenomenal crescimento. (Siddique, 2008)

Concomitantemente com a expansão das aplicações e da produção, houve o aumento na geração de resíduos provenientes de tais produtos. Estes resíduos geram grande impacto ambiental em função de seu volume, resistência à degradação natural e, eventual toxicidade, pois muitas vezes envolve o uso de produtos químicos potencialmente nocivos, que são adicionados como estabilizadores ou corantes. Muitos destes não foram submetidos a uma avaliação dos riscos ambientais e seu impacto sobre a saúde humana e o meio ambiente é atualmente incerto. Tal exemplo são os ftalatos, que são utilizados na produção de PVC ( policloreto de vinila). (Siddique, 2008)

Portanto, a preocupação com questões ambientais tem crescido. Inúmeros trabalhos acadêmicos no âmbito de redução de impactos através da reciclagem têm sido feitos, em consonância com a intensificação das legislações ambientais Um exemplo é o estudo realizado por Vidales, o qual buscou contribuição ao ecodesign com reciclagem de blendas e outro é o estudo feito por Cândido, que estudou os ciclos de reprocessamento de blendas. (Vidales, 2013; Cândido, 2011)

Diante de tal panorama, o estudo do ciclo de vida dos produtos industrializados tem sido feito e otimizado com o intuito de aumentar seu tempo de vida, minimizando os impactos ambientais de todo o ciclo, desde a produção até o descarte final. Portanto, o desenvolvimento de produtos sustentáveis, o qual abrange a reciclabilidade, é fundamental para o prolongamento do ciclo de vida dos materiais. (Vidales, 2013)

No Brasil, só no ano de 2013, foram transformados 6,76 milhões de toneladas de plásticos. A previsão do setor para 2014 era de um aumento de 1,8% na produção. Parte dessa produção foi exportada (255 mil toneladas). Além de todo o material originário do próprio Brasil, existem ainda materiais oriundos de importação. No ano de 2013 foram importadas legalmente 731 mil toneladas de transformados plásticos. (Abiplast, 2013) Além destes, existem muitos materiais de importação ilegal, que entram no país através de “Descaminhos”, mais conhecidos (erroneamente) como contrabando.

Por possuírem inúmeras aplicações, os polímeros são apresentados nos mais variados produtos, um dos quais óculos, um dos grandes objetos de importação ilegal. Segundo Vidales, (Vidales, 2013) no ano de 2010 no Brasil foram apreendidos 12,5 milhões de óculos falsificados.

No presente estudo, objetivo foi estudar a viabilidade de reciclagem deste material proveniente de apreensão. Tal material apreendido pela Polícia Federal, em função da Política Nacional de Resíduos Sólidos 12305/ 2010 e de portaria Interna da Receita Federal, deve ser destinado adequadamente. (Receita Federal, 2011)

No caso de materiais poliméricos, a reciclagem, ou reprocessamento, implica na perda de propriedades mecânicas e físico-químicas do polímero. Principalmente em resíduos de origem doméstica, os quais sofrem processo de descontaminação antes do

reprocessamento, que, por sua vez, pode ser muito agressivo e conseqüentemente causar degradação e perda das propriedades antes mesmo do reprocessamento.

No presente trabalho a perda de propriedades através do reprocessamento pode ocorrer e provocar um decréscimo no ciclo de vida dos produtos gerados.

Portanto os objetivos principais são avaliar as propriedades mecânicas de tais materiais após o reprocessamento e fazer comparação de suas propriedades com materiais classicamente aplicados através do software de seleção de materiais – Cambridge Engineering Selector - CES/2013.

Sendo assim, fazer o processo ao inverso, tendo o material e comparando suas propriedades com materiais rotineiramente utilizados em determinadas aplicações, propor sua substituição.

## **2. Revisão Bibliográfica**

Neste capítulo a teoria da reciclagem, a problemática dos produtos falsificados, bem como os materiais envolvidos na sua fabricação e a reciclagem destes serão abordados. Além da contextualização pertinente ao consumo como um todo e a seleção de materiais pós-consumo para reciclagem.

### **2.1. Reciclagem de polímeros**

O aumento na produção de bens de consumo e a redução do seu ciclo de vida aumenta vertiginosamente a quantidade de resíduos, forçando assim, a criação de novas tecnologias para diminuir seus impactos. Contudo, dificuldades na separação dos componentes de um produto, resíduos pós-consumo e descarte inadequado inviabilizam a plena reciclagem. (Cândido, 2011)

Historicamente reciclagem na indústria do plástico sempre foi realizada dentro de empresas de manufatura como parte do processo de produção padrão. Na extrusão, por exemplo, muitas vezes, onde a contaminação é permitida, a sucata é reprocessada com material virgem, para melhorar o rendimento e as propriedades finais do material. Os resíduos, tanto comercial quanto pós-consumidor são destinados a aterros. (Goodship, 2007)

A reciclagem em geral é complexa. Os polímeros possuem ciclos e interações com grau de complexidade mais elevado do que a população em geral imagina, envolvendo diferentes etapas de reciclagem e tipos de profissionais distintos. (Zanin, 2004)

Para tanto, existem normas internacionais que definem e classificam a reciclagem, como a norma da Sociedade Americana de Ensaio de Materiais – ASTM - D5033, com o intuito de



uniformizar conceitos e métodos. (Cândido, 2011; Zanin, 2004) Esta classifica a reciclagem em quatro tipos:

1. Reciclagem Primária – matéria-prima de fonte absolutamente confiável e limpa. Em geral resíduo gerado pela indústria durante o processo. São as sobras que são reintroduzidas na produção. A matéria-prima deve conter propriedades similares ou iguais à matéria-prima virgem e o produto final é o material reciclado com propriedades semelhantes à resina virgem.
2. Reciclagem Secundária – matéria-prima proveniente de resíduo sólido urbano, podendo eventualmente ser industrial, a qual gera produtos com características técnicas diferentes do produto original, sendo estas inferiores à resina virgem.
3. Reciclagem Terciária – processo utilizado via química, ou despolimerização, gerando monômeros e substâncias de baixa massa molar que podem ser reutilizadas no processo produtivo direto ou indireto.
4. Reciclagem Quaternária – é a reciclagem energética, onde o processo utilizado é a combustão do material visando aproveitar o conteúdo energético deste.

Na mesma norma são definidos os processos de reciclagem que o polímero sofrerá. O processo também pode ser visto como outra forma de classificação dos tipos de reciclagem.

(Zanin, 2004)

1. Reciclagem Mecânica – quando o produto sofre etapas manuais ou mecânicas de seleção moagem, lavagem, secagem, aglutinação e reprocessamento. Neste processo o material virgem pode ser adicionado visando à melhora das propriedades do produto final. Porém a qualidade do produto final depende do processo.

2. Reciclagem Química – processo de despolimerização aplicado a materiais com incompatibilidade química necessária ao processo. Os produtos podem ser utilizados na geração de novas composições e a linha de produtos é a mesma da reciclagem terciária citada anteriormente.
3. Reciclagem Energética – processo de incineração controlado, visando à geração de energia, esta podendo ser térmica ou elétrica. Os subprodutos são dispostos em aterros sanitários controlados.

Na Figura 1 é possível visualizar um panorama geral deste processo.

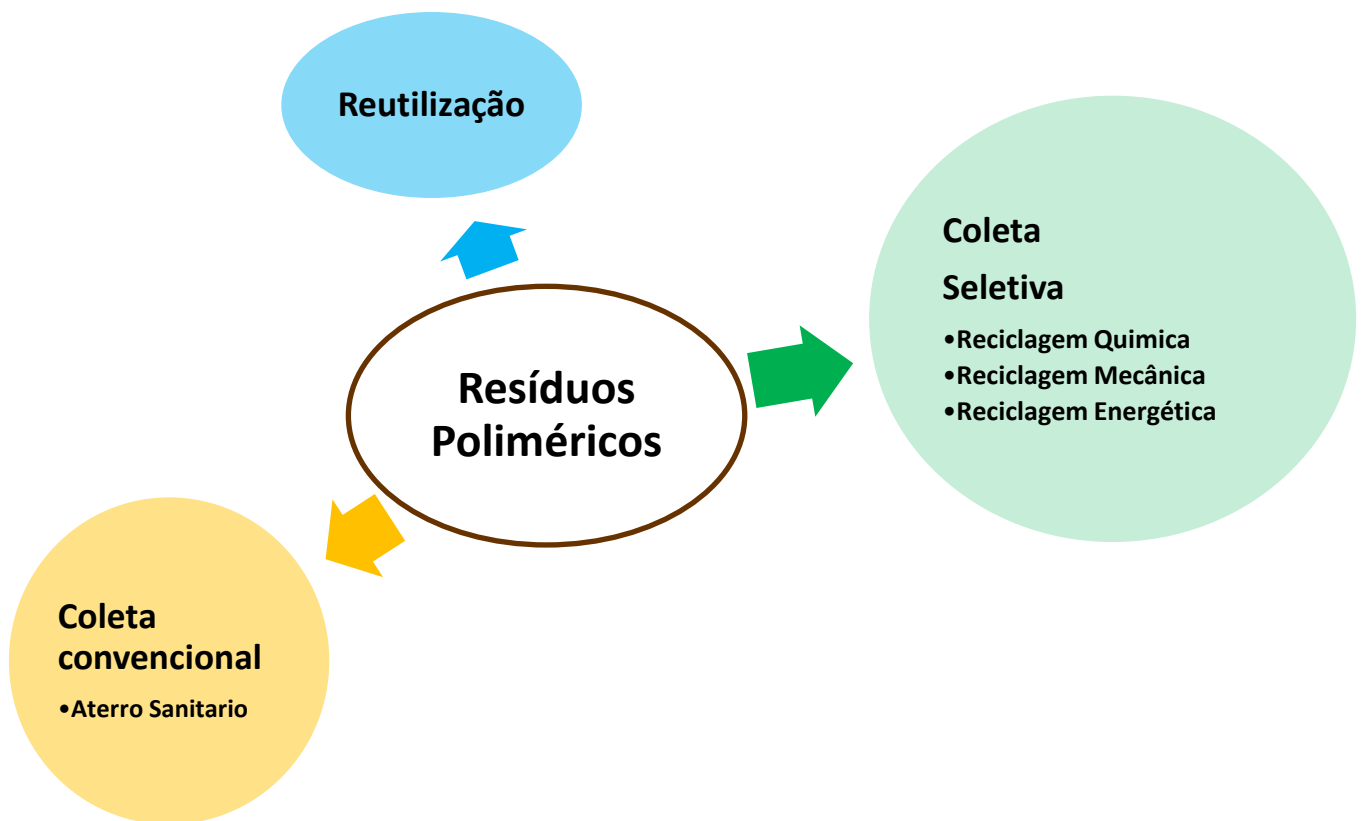


Figura 1: Representação do ciclo dos produtos poliméricos pós-consumo. Adaptado de (Zanin, 2004).

Neste trabalho, pela facilidade e popularidade da técnica, a reciclagem mecânica será a utilizada.

## 2.2. Policarbonato

O Policarbonato (PC) é um material termoplástico amorfo que começou a ser fabricado industrialmente em 1953 pela Bayer e General Electric independentemente. (Dumont, 2007)

A capacidade total mundial de produção em 2012 foi estimada em 4,7 milhões de toneladas. (Pardos, 2012)

Mais comumente é sintetizado pela reação do bisfenol A (BPA) e fosgênio ( $\text{COCl}_2$ ) solubilizado em solvente orgânico, diclorometano, por reação de policondensação interfacial. Neste processo, o PC é formado na interface de uma solução aquosa de alcóxido bisfenol A de sódio e solução de fosgênio em diclorometano. O PC se torna solúvel na fase orgânica à medida que este se forma. Após sua síntese a resina passa por processos de extração, concentração, precipitação e secagem. (Defferrari, 2013; Dumont, 2007; LeGrand, 2000) Uma ilustração do processo está no anexo A.

A representação do seu mero pode ser vista na Figura 2 a seguir.

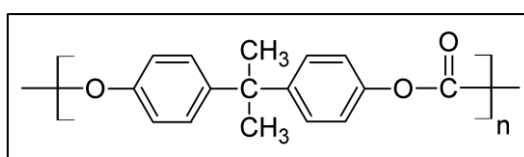


Figura 2: Representação da estrutura química do mero do Policarbonato (Canevarolo, 2010).

Essa rota de produção tem sofrido variações e estudos alternativos em função da toxicidade do fosgênio visando suprimi-lo, pois além de tóxico, é corrosivo e extremamente poluente, tendo já sido utilizado como arma química na Primeira Guerra Mundial. (Pardos, 2012; Dumont, 2007)

As vantagens do policarbonato são a transparência, que confere uma excelente estética, alta resistência ao choque, alta resistência térmica, que permite sua utilização até 120 °C, boas propriedades elétricas, estabilidade dimensional, alto índice de refração, facilidade de colorir e misturar, resistência à chama sem halogênios e propriedades estruturais ajustáveis para aplicações de engenharia e bens de aplicações duráveis. (LeGrand, 2000; Dumont, 2007)

As propriedades que causam desvantagem na aplicação do policarbonato são baixa resistência a agentes químicos, baixa resistência à abrasão, necessidade de secagem antes de emprego e necessidade de aditivos para resistir à radiação UV. Além da toxicidade do foscênio, precursor da formulação na rota de síntese por policondensação, e o Bisfenol A. (Pardos, 2012; Dumont, 2007).

As propriedades mecânicas e físico-químicas conferem essas vantagens e/ou desvantagens, algumas podem ser visualizadas na Tabela 1:

Tabela 1 Algumas propriedades do Policarbonato

<b>Propriedade</b>	<b>Valor</b>
<b>Modulo de Young</b>	2,32 – 2,44 GPa
<b>Elongação</b>	100 - 120%
<b>Resistência ao impacto IZOD (ISO 180)</b>	Entalhado: 12 kJ/m <sup>2</sup> Não entalhado: Não rompe
<b>Densidade</b>	1,20 g/cm <sup>3</sup>
<b>Índice de refração</b>	1,58
<b>Temperatura de Transição Vítrea</b>	142 – 158°C
<b>Temperatura de fusão</b>	226 – 322°C

Fonte: (Dumont, 2007; Ashby, Cambridge Engineering Selector Software, 2013).

O PC é um termoplástico muito evoluído, possuindo diversas formulações, denominadas “grades”. Ele se apresenta também em diversas blendas, as quais as mais importantes são PC/ABS e PC/PBT, sendo usado também em blendas com PET e outros estirenos. (Pardos, 2012)

Em função de tamanha diversidade de grades e conseqüentes propriedades surgem aplicações diversas. Uma das mais conhecidas são as mídias óticas (CD e DVD), mas atualmente em declínio em função das novas tecnologias de armazenamento. O setor que mais emprega tal material é o da construção, em vidraças, caixas de ar condicionado, telhas e substituições de vidro em geral. Outros campos de aplicação são o automobilístico – faróis dos carros -, setor de embalagens – garrafas reutilizáveis -, equipamentos eletrodomésticos, aplicações médicas entre outras. (Dumont, 2007; Pardos, 2012)

### ***2.2.1. Reciclagem de policarbonato***

Devido aos diferenciados usos deste polímero, e grande parte da sua aplicação ser em mídias de armazenamento, os CDs, os resíduos pós consumo de PC podem ser reaproveitados na reutilização e através de reciclagem propriamente dita. A reciclagem pode se dar via Reciclagem Química ou Mecânica, sendo esta última mais comum e simples.

#### **A. Reciclagem química**

O Policarbonato pode ser completamente decomposto em seu monômero BPA (bisfenol A) fazendo uso de alta pressão e alta temperatura (573K ~ 300°C) em uma reação de apenas 5 minutos. De acordo com o autor, o rendimento máximo do BPA era cerca de 80% em mol com base no PC de partida. (Watanabe, 2009) A rota de tal processo pode ser visualizada no anexo A.

## **B. Reciclagem Mecânica**

A reciclagem mecânica é um método muito empregado no último século e tem capacidade de re colocação de matéria prima elevada. É um processo que pode ser muito complexo quando se trata de resíduos urbanos, envolvendo etapas de separação, pré-lavagem, lavagem, enxágue, moagem e secagem, cuidados com efluentes e por fim a transformação. Esta que pode se dar por qualquer método de transformação aplicado a polímeros virgens: extrusão, injeção, prensagem, etc. no caso da reciclagem, a extrusão é o mais importante.

Por este se tratar de um processo mais simples, pode encontrar maior emprego, pois exige equipamentos comuns em processamento de polímeros, sem nenhuma modificação requerida. (Zanin, 2004)

Para o presente estudo, foi escolhida a Reciclagem Mecânica, justamente em função da sua facilidade.

### **2.3. A Problemática dos óculos falsificados**

Segundo relatório aduaneiro de 2013 da Receita Federal o volume de óculos apreendidos no mesmo ano no Brasil foi equivalente a R\$ 55.922.486,90. (Receita Federal, 2013)

Em 2012 a venda de óculos falsificados no Brasil representou 41% das vendas do mercado, como pode ser observado na *Figura 3*.



Figura 3: Apreensão de óculos falsos em São Paulo (G1, 2013).

A notícia ressalta não só o problema mercadológico ou ambiental que tais produtos causam, mas principalmente os problemas de saúde que o uso de tais acessórios pode trazer ao consumidor. <sup>1</sup> (G1, 2013)

No mesmo artigo é citado que apenas 0,4% de tais produtos seguem as normas de fabricação. Portanto é certo dizer que não é uma questão simplesmente econômica a sua proibição.

A maior parte destes produtos voltados para a proteção solar tem origem chinesa e seguem tendências de moda, que a cada momento favorece uma matéria-prima diferente. (Sant'Anna, 2008)

---

<sup>1</sup> Milton Ruiz Alves, presidente do CBO, explica que, quando uma pessoa usa óculos de sol, a pupila se dilata naturalmente porque o organismo entende que está em um ambiente escuro. Se esses óculos não tiverem a proteção adequada contra os raios UVA e UVB, aumenta a chance de degeneração da mácula, região mais sensível da retina, o que pode levar à catarata. Ou seja: usar óculos de sol inadequados é mais prejudicial à visão do que não usar óculos algum. (G1, 2013)

Apesar de tal preocupação e fiscalização, os produtos apreendidos não encontram um fim adequado. O Brasil possui desde 2010 a Política Nacional de Resíduos Sólidos, a qual dispõe sobre o destino final e as responsabilidades de cada produtor para com seus produtos.

No caso de apreensões a partir de materiais provenientes de fora do país, o órgão apreensor se torna o responsável por dar um fim a tais produtos. Com o objetivo de regulamentar as ações nesse sentido, a Receita Federal brasileira normatizou tal procedimento internamente através da Portaria RFB N 3010 de 29 de junho de 2010. Ficando determinado que produtos de apreensões devam ser dispostos de forma a serem destruídos/inutilizados.<sup>2</sup> (Receita Federal, 2011)

É possível notar, a partir dos dados explanados a cima, que o volume de material proveniente de tal nicho de mercado é muito alto. Portanto, faz-se necessário o estudo de possíveis medidas para minimizar o impacto causado por tais materiais.

## **2.4. Óculos e materiais**

A constituição básica de um óculos é armação e lente, contudo a armação pode ser bem complexa, sendo composta por peças que vão de minúsculos parafusos às peças frontais e haste, como pode ser observado na **Figura 4**:

---

<sup>2</sup>Capítulo VIII Da Destruição ou Inutilização

Art. 40. A destruição ou inutilização deverá ser efetuada por meio de procedimento que descaracterize os produtos, tornando-os impróprios para os fins a que se destinavam originalmente.

§ 1º Nos procedimentos de que trata este artigo, sempre que possível, deverão ser adotadas as formas que possam resultar em resíduos cuja reciclagem seja economicamente viável. (Receita Federal, 2011)





**Figura 4: Exemplo dos componentes de óculos comum (Smart Oculos)**

Segundo (Sant'Anna, 2008), “Em média, um par de óculos possui 20 peças, feitas de metais, plásticos ou outros materiais. Esses itens são produzidos por diferentes métodos industriais e exigem várias operações complementares. Para a produção de um par de óculos são necessárias 350 operações industriais, em média. Mesmo o modelo mais simples não fica pronto antes da realização de no mínimo 200 operações”. Os materiais de tais produtos variam de acordo com a tendência, porém os materiais termoplásticos são dominantes, tanto nas armações quanto nas lentes em função dos processos de produção. As lentes eram costumeiramente de vidro, contudo desde os anos 70 os polímeros têm tomado seu espaço, fazendo com que os óculos sejam constituídos por, em quase sua totalidade, polímeros. Isso propicia vantagens como leveza, resistência à quebra e possibilidade de cores diversas. Em função das propriedades óticas, as lentes exigem polímeros específicos. O mais usado é o CR39, e em segundo lugar o Policarbonato. (Sant'Anna, 2008)

Já as armações possuem maior liberdade, porém exigem polímeros termoplásticos em função de seu processamento, que é por injeção.

No caso dos óculos em questão, como pode ser observado na Figura 5, sua constituição é praticamente somente polimérica, com exceção do parafuso que conecta a haste à armação.



Figura 5: Óculos recebido da PF pelo LdSM

Segundo estudo realizado por Vidales (Vidales, 2013) em outro lote apreendido pela PF a constituição dos óculos é PC e PMMA, onde a armação é composta por PC e as lentes por PMMA.

Tais materiais apreendidos e exigências legais tornam a reciclagem uma alternativa real para além de cumprir a lei, fazê-lo pensando nas consequências para o meio ambiente, gerando assim uma nova matéria prima que possa ser reutilizada em outras aplicações de acordo com as eventuais necessidades e solicitações.

## **2.5. Seleção de materiais e Reciclagem**

Ao longo da história da humanidade os materiais definiram o desenvolvimento e caracterizaram as sociedades que os utilizavam. Houve a idade da pedra, do cobre, entre outras. É possível inferir que hoje estejamos na idade dos plásticos.

Selecionar materiais é um processo muito mais complexo que se imagina, não sendo somente combinar requisitos de um produto com o fim de selecionar um único material adequado para suprir tais necessidades, mas começando com as definições das condições de trabalho do material. (Dias, 2009)

A seleção de materiais e a reciclagem podem ser vistas como áreas complementares, no que tange ao projeto de um produto. Sabe-se que um projeto, a forma determinada de um produto, depende intrinsecamente do material que será utilizado. (Ashby, 2010)

Na era atual, onde os polímeros são um dos materiais mais utilizados, como nota-se na Figura 6, pode-se assumir que a preocupação ambiental tem crescido muito.

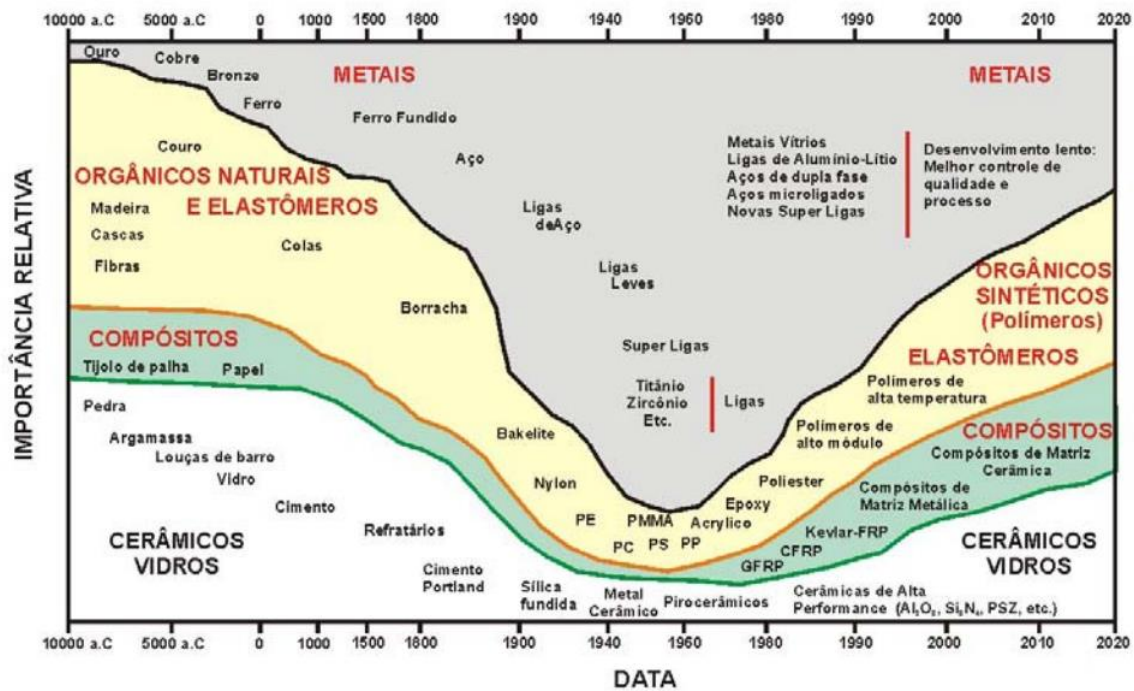


Figura 6: Evolução dos Materiais de Engenharia com o Tempo; Adaptado de (Ashby, 2010).

Portanto, a extração de matéria prima de fontes não renováveis está se esgotando, desencadeando novas tecnologias de reaproveitamento dos materiais já processados.

### 3. Procedimento Experimental

#### 3.1. Recepção dos óculos apreendidos

Os óculos foram recebidos da Policia Federal desmontados. A armação já com as lentes, separadas das hastes, e os parafusos para unir em uma embalagem plástica separada. As armações vieram embaladas uma a uma em um filme plástico. Estas, por sua vez, estavam

agrupadas a cada cinco unidades com uma borracha de látex, como pode ser visualizado na Figura 7 a seguir.



Figura 7: óculos como apreendidos pela Polícia Federal

### 3.2. Desembalagem /Desmontagem

A primeira etapa da reciclagem mecânica é a separação de materiais, portanto foi o primeiro passo dado no sentido de preparar o material para a reciclagem.

O começo se deu com a separação das armações agrupadas, em seguida retirada de suas embalagens plásticas e, por fim, a remoção das lentes das armações. Todas etapas forma manuais e realizadas no Laboratório de Polímeros Avançados do Instituto de Química UFRGS-LPA/IQ. As etapas podem ser visualizadas na Figura 8.



Figura 8: Primeira etapa de separação

### 3.3. Trituração

A trituração, etapa fundamental do reprocessamento, foi feita em um moinho de facas rotativo, visualizado na Figura 9, no LPA/IQ. O Moinho é o modelo MGAS 27180 da marca SEIBT.



Figura 9: Moinho SEIBT de facas rotativo do LPA/IQ, modelo MGAS27180

Nessa etapa foram obtidos “flakes” do material, como pode ser visto na 10, que servirão para processamento.



**Figura 10: "Flakes" obtidos apo's moagem**

Na indústria em geral, esta etapa é seguida por lavagem e secagem. Como no presente estudo o material pode ser considerado limpo, os flakes sofreram somente o processo de secagem, em primeira tentativa à 60°C por 5h em estufa no LDSM. Tais condições foram utilizadas em função da limitação do equipamento. Num segundo momento foram secos a 100 °C por 6h, em um equipamento próprio para tal, visto na Figura 11.



**Figura 11: Equipamento de secagem do CETEPO**

O equipamento funciona passando ar seco e quente através dos flakes, o que o torna mais eficiente que uma estufa.

### **3.4. Análise Espectroscopia por Infra Vermelho com Transformada de Fourier**

Esta técnica é fundamental para caracterização de materiais poliméricos, aplicada na análise qualitativa destes e suas misturas. Através da avaliação dos picos e suas respectivas bandas é possível a determinação da composição da amostra. (Cândido, 2011)

O Ensaio foi realizado no FTIR do LdSM (da marca Perkin Elmer, modelo Spectrum 100, representado na Figura 12) nos óculos apreendidos, antes da trituração, para verificar a real composição química e, assim, definir os parâmetros da injeção. Este equipamento utiliza o acessório para obter a Refletância total atenuada, ATR. Tal acessório tem por objetivo obter espectros de qualidade de polímeros em forma de filme, folha plana, chapa plana, líquido ou em solução, devendo a amostra estar em perfeito contato físico com o cristal. (Canevarolo, 2007)



Figura 12: FTIR do LdSM

### 3.5. Reprocessamento – Injeção

Um dos processos mais modernos na transformação de termoplásticos é a injeção. Suas principais características são versatilidade de forma e velocidade de processamento, tornando este um dos mais utilizados no processamento de polímeros. Existem diversos tipos de injeção, a convencional, a injeção com água, a micro injeção, entre outras. (Manrich, 2005)

Para avaliação das propriedades mecânicas, corpos de prova foram confeccionados de acordo com a ASTM D638 para tração e ASTM D256 para impacto, pelo processo de injeção convencional nos formatos vistos a seguir nas Figura 13 e Figura 14.



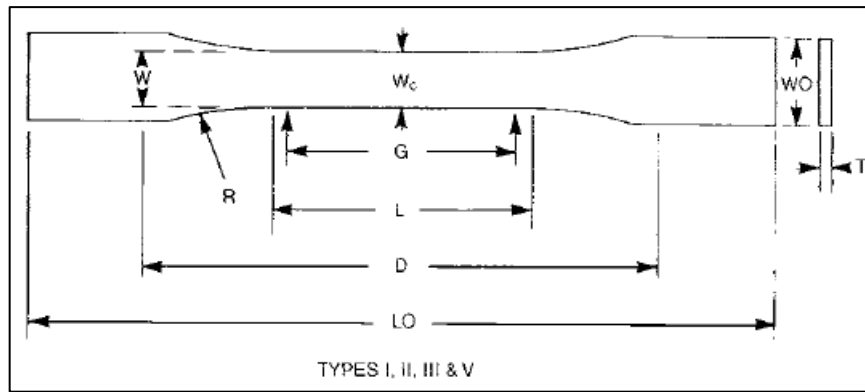


Figura 13: Modelo de Corpo de Prova para ensaio de tração determinado pela ASTM D638

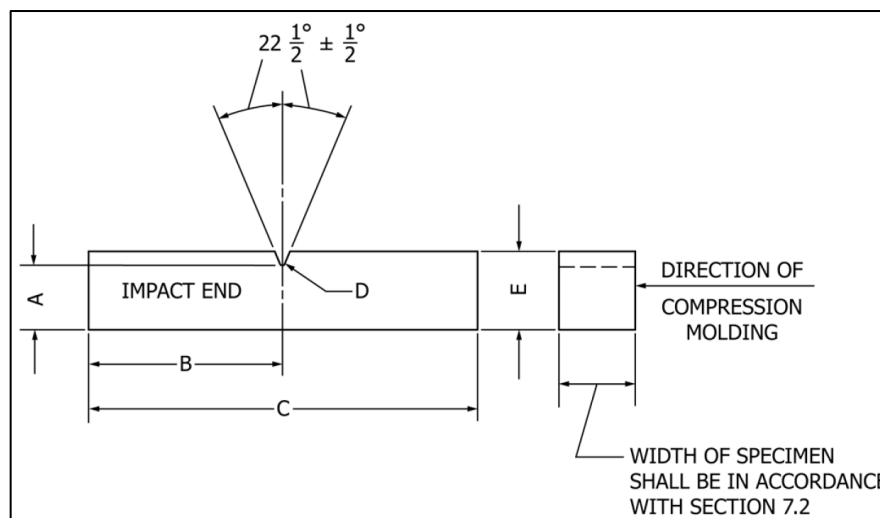


Figura 14: Modelo de Corpo de Prova para ensaio de impacto Izod determinado pela ASTM D256

A injetora é composta por um sistema capaz de homogeneizar e injetar o polímero, sistema semelhante ao da extrusão: a rosca recíproca. E um molde, peça projetada para dar a forma do produto final, e esfriar a peça através de resfriamento controlado. (Manrich, 2005)

Em uma primeira tentativa, uma mistura de 50% de Policarbonato virgem e 50% de Policarbonato Reciclado foi injetada. A injetora utilizada foi a do LPA-IQ (Laboratório de Polímeros Avançados do Instituto de Química), modelo PLUS 350, da marca Battenfeld, visualizada na Figura 15.



Figura 15: Injetora do LPA modelo PLUS 350, da marca Battenfeld

De acordo com a literatura consultada, as temperaturas ideais de processamento de PC virgem são: temperatura do fundido 270 a 235 °C, e a temperatura do molde entre 80 e 110°C, pressão fechamento requerida 3-5 ton./in<sup>2</sup>, pressão de Injeção típica de 140 a 200 MPa (Manrich, 2005)

A injeção foi adaptada de acordo com as condições apresentadas no momento do processamento, porém foram baseados nos dados fornecidos pelo fabricante de Policarbonato virgem. Os parâmetros iniciais de injeção são apresentados na **Tabela 2**:

Tabela 2: Parâmetros iniciais de Injeção no LPA-IQ

	Temperatura °C
Zona 1	50
Zona 2	270
Zona 3	280
Zona 4	50

Nesta etapa houve grandes problemas no que concerne ao processamento. Ao iniciarmos com temperaturas altas, o material submetido a tal procedimento apresentou degradação e fluidez excessiva. Para resolver tal problema as temperaturas foram reajustadas, diminuindo-as em torno de 100°C, dados apresentados na **Tabela 3** a seguir.

**Tabela 3: Parâmetros finais de processamento no LPA**

	<b>Temperatura °C</b>
Zona 1	44
Zona 2	190
Zona 3	170
Zona 4	30

Alguns poucos corpos de prova, vistos na **Figura 16**, foram obtidos até que problemas de preenchimento do molde ocorreram e impossibilitaram a continuidade de tal procedimento. Tais corpos de prova apresentaram visualmente uma falha, a qual foi evidenciada por diferentes fases visíveis.



**Figura 16: Corpos de Prova para tração obtidos na injetora do LPA**

Para resolver tais problemas, nova injeção foi feita. Neste caso, entrou-se em contato com o CETEPO, Centro de tecnologia de Polímeros em São Leopoldo-RS, com o intuito de utilizar os seus equipamentos e capital humano.

Neste caso, os corpos de prova foram preparados em uma injetora de termoplásticos da marca Battenfeld, com tonelagem máxima de 110 ton. e capacidade de injeção de 106 cm<sup>3</sup>, modelo TM 110/210, vista nas **Figura 17****Figura 18**. Com o auxílio do responsável nova injeção foi feita.



Figura 17: Injetora do CETEPO, visão da lateral da rosca recíproca, modelo TM 110/210 da marca Battenfeld.



Figura 18: Injetora do CETEPO, visão do molde de injeção e painel de controle, modelo TM 110/210 da marca Battenfeld.

Em função dos problemas de temperaturas apresentados na tentativa anterior, o técnico optou por começar a baixas temperaturas e aumentar conforma a necessidade. Os parâmetros finais utilizados são visualizados na **Tabela 4**

**Tabela 4: Parâmetros finais de injeção feita no CETEPO**

<b>Temperatura de Processo (°C)</b>				
Zona 1	Zona 2	Zona 3	Bico	Molde
250	230	200	260	100
Grupo de Fechamento				
Fechamento e Abertura				
Curso de abertura (mm)		250		
Força de fechamento (ton.)		60		
Grupo de injeção				
Injeção e Recalque		Plastificação e Descompressão		
Pressão de injeção (bar)		1100	Contra-pressão (bar)	40
Velocidade de injeção (mm/s)		120	Velocidade da rosca (mm/s)	300
Pressão de recalque (bar)		800	Curso de dosagem (mm)	52
Tempo de injeção e recalque (s)		6,7	Curso de descompressão (mm)	4
Tempos de Processo				
Tempo total de ciclo (s)		37,4	Tempo de molde aberto (s)	16,7
Tempo de resfriamento (s)		15	Tempo de molde fechado (s)	21,7

Nessa etapa foi possível a obtenção dos corpos de prova necessários aos ensaios de tração e impacto, visualizados na seção a seguir. Contudo nota-se ainda certa “separação de fases”, discutida mais adiante.

### **3.6. Ensaio de Tração**

Comparados aos metais e cerâmicos os polímeros apresentam propriedades mecânicas inferiores. Isso se dá em função dos tipos de ligação, e, por consequência, de estrutura que formam estes materiais. O comportamento destes materiais pode ser utilizado para classificar os diversos tipos de polímeros em termos de rigidez, fragilidade e tenacidade. (Canevarolo, 2007)

Uma das maneiras mais simples, práticas e eficientes é o ensaio de tração, o qual fornece a curva de tensão x deformação, propiciando a obtenção de diversos parâmetros do material, um deles é distinguir o comportamento como frágil ou dúctil. (Canevarolo, 2007)

Para a realização de um ensaio de tração, corpos de prova são necessários, e para fins de comparação com padrões, uma norma regulamenta a maneira que estes devem ser confeccionados e o ensaio de tração procedido.

Neste trabalho, os corpos de prova foram confeccionados de acordo com ASTM D638, podem ser visualizados na figura a seguir. Foram obtidos 10 no total.



**Figura 19: corpos de prova para tração obtidos por injeção no CETEPO**

O Ensaio foi realizado na máquina de ensaio universal da Oficina de Modelos e Protótipos da Faculdade de Arquitetura, da marca Shimadzu, mostrada na Figura 20. A célula de carga utilizada foi de 5 kN e o ensaio, de acordo com a norma, foi procedido com velocidade de 5 mm/min.



Figura 20: Máquina de Ensaio Universal Modelo EZ-LX da Marca Shimadzu

### 3.7. Ensaio de Impacto

A resistência ao impacto é uma das propriedades mais importantes para classificar o comportamento de um material, principalmente de polímeros. Este tipo de ensaio fornece a capacidade que um material possui em absorver energia, ou seja, de suportar choques acidentais. Tal comportamento determina o sucesso ou não de um material em uma aplicação que seja exposta a tal tipo de acontecimento. Apesar da evidente importância, tal teste não é inteiramente confiável, pois, mesmo fazendo uso de um teste padronizado, a resistência ao impacto obtida não é uma propriedade intrínseca do material. Pois esta depende de várias variáveis, como temperatura, velocidade e geometria. Portanto, tal ensaio acaba sendo um parâmetro não tão determinante no processo de seleção de materiais.

Porém, de uma forma geral, dados de ensaios de impacto geram bons projetos, desde que as condições do ensaio sejam semelhantes às de serviço. (Canevarolo, 2007)



A maioria dos ensaios de impacto utilizam entalhes no corpo de prova, e a energia necessária para romper este é o resultado buscado. Tal energia é fornecida pelas máquinas de ensaio e representa um balaço da energia cinética e potencial que o martelo é submetido.

Neste trabalho, a máquina de ensaio utilizada foi a CEAST 9050 da marca Instron, da Oficina de Modelos e Protótipos da Faculdade de Arquitetura, visualizada na **Figura 21**. A carga do martelo utilizada foi 5,5J.



**Figura 21:** Máquina de ensaio de impactos, modelo CEAST 9050, da marca Instron.

Para a realização de tal ensaio, corpos de prova (de acordo com a norma D256), são necessários e podem ser visto na **Figura 22**.

Para avaliação de resistência ao impacto, 10 corpos de prova foram obtidos por injeção e ensaiados pelo método Izod, especificado na ASTM D256.

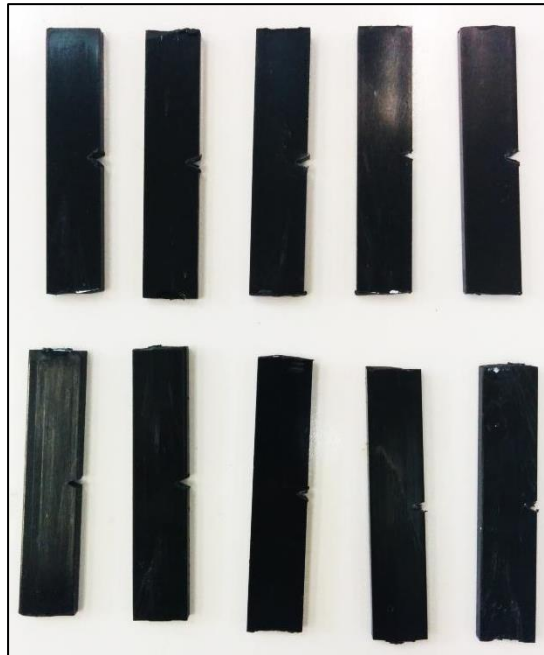


Figura 22: Corpos de prova para ensaio de impacto injetados no CETEPO.

### 3.8. Software CES

O Software CES, - Cambridge Engineering Selector – desenvolvido por Ashby, tem o intuito de auxiliar no projeto de produto, facilitando a comparação de variáveis em materiais distintos. É um software que permite aos profissionais de engenharia e design explorar e aplicar dados de mais de 4000 materiais. É uma ferramenta que pode auxiliar a seleção de materiais, possui exportação de informações de propriedade dos materiais, dados complexos para substituição de metais, extensa cobertura de propriedades dos polímeros, compósitos e biomateriais. Sua pagina inicial pode ser visualizada na Figura 23. (Ashby, Cambridge Engineering Selector Software, 2013)

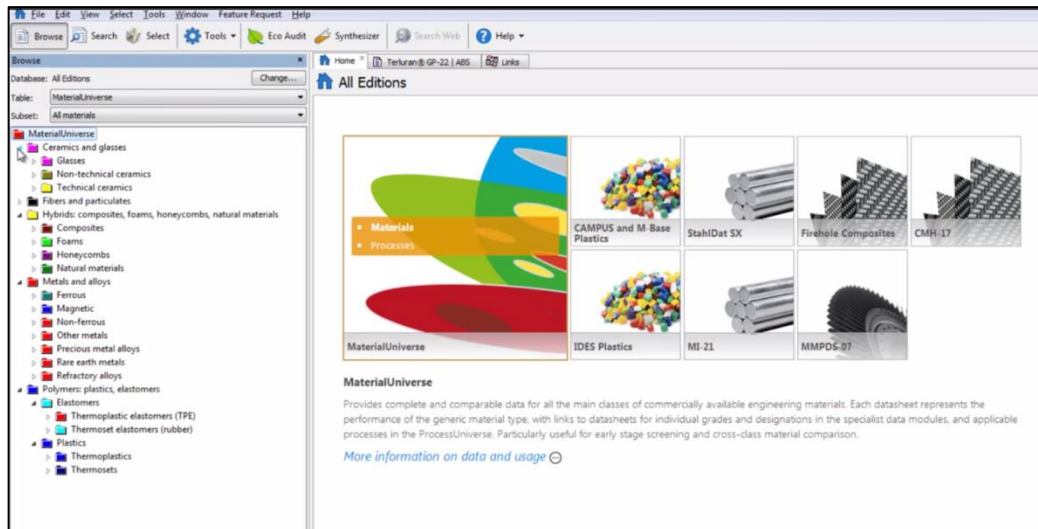


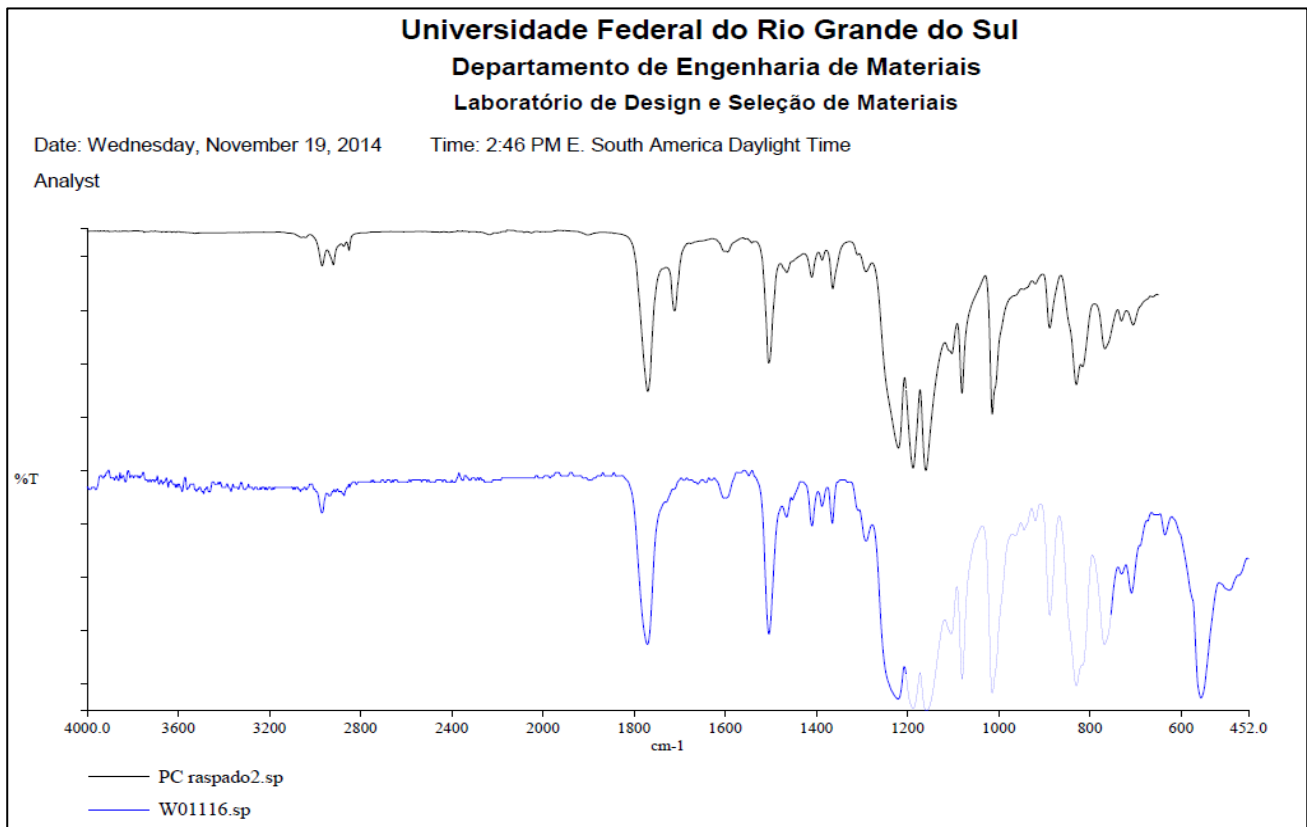
Figura 23: Exemplo do CES e suas opções na página Inicial (Ashby, Cambridge Engineering Selector Software, 2013)

É uma ferramenta de auxílio para a avaliação das propriedades dos materiais, no qual podemos procurar por processos de produção, inserir solicitações, obter dados de materiais, entre outras inúmeras possibilidades. No presente trabalho este software foi utilizado para obterem-se as propriedades do Policarbonato virgem, e após os resultados dos ensaios mecânicos os dados do policarbonato reciclado foram inseridos no software com o intuito de comparar tais dados ao policarbonato virgem, que se encontram no anexo C, e avaliar aplicações já existentes do próprio Policarbonato e possíveis novos empregos.

## 4. Resultados e discussão

### 4.1. Análise química

Na **Figura 24** é apresentado o espectro de Infra Vermelho da armação dos óculos, de sua base em preto e em azul é possível ver o padrão de referência.



**Figura 24:** Espectro de FTIR da armação do óculos.

Fazendo a comparação através do software, foi possível afirmar que tal composto é policarbonato. O software indicou uma marca comercial de resina de Policarbonato com 93,5% de semelhança com o policarbonato presente na armação dos presentes óculos.

O material apresenta um revestimento com aparência emborrachada, o qual pensou-se, poderia influenciar no processamento. Foi feita tentativa de investigar qual composto se tratava. As técnicas de caracterização foram o IR-ATR do LDSM, FTIR e RMN no Instituto de Química, contudo não foi possível obter conclusão satisfatória. Pelos espectros, que podem

ser vistos no anexo D, tem-se indicações de CH<sub>3</sub>, CH, C=O, e OH. Portanto, se faz necessária uma análise mais precisa e com auxílio de outras técnicas. É importante salientar que tal revestimento realmente não impediu o reprocessamento do material, apesar de as condições de processamento terem sido peculiares. É possível inferir que este revestimento, bem como aditivos no policarbonato proveniente dos óculos devem ter alterado as condições de processamento, contudo não foram impeditivas deste.

#### **4.2. Procedimento de injeção**

Problemas durante a injeção foram enfrentados. Em um primeiro momento os corpos de prova obtidos não foram suficientes e apresentaram distinção de fases. Cogitou-se a possibilidade de ser uma baixa homogeneização do fundido. Neste momento foi pensada a necessidade de uma etapa anterior de miscibilização, ou seja, uma extrusão. Para tanto, buscamos o CETEPO para fazer uso de um equipamento adequado. No CETEPO o equipamento utilizado também foi uma injetora, sem extrusão prévia. A diferença de tais injetoras se dá principalmente na capacidade e pressões de trabalho.

Em consulta à literatura e em conversa com os técnicos do CETEPO, soube-se que o Policarbonato é um polímero de difícil processamento. Apresenta alta viscosidade, exigindo assim, altas temperaturas e pressões.

Em roscas menores, com zonas curtas de compressão, a passagem do material por tal etapa é rápida, o que gera grande cisalhamento devido à alta compressividade, o que pode causar superaquecimento localizado. Essa situação se pronuncia em polímeros com alta viscosidade, como é o caso do policarbonato. (Manrich, 2005) Essas particularidades podem ter gerado os problemas observados na primeira tentativa de injeção no LPA, onde foram observadas alta fluidez e degradação do material, em função da alta temperatura atingida.

O processamento no CETEPO apresentou-se igualmente difícil, com problemas de preenchimento do molde, entupimento dos canais de injeção e dificuldade de ejeção da peça. Contudo, com a experiência do técnico, tais situações foram superadas e os corpos de prova foram obtidos com sucesso.

Apesar de esta etapa ter gerado os corpos de prova, ainda foram verificadas as “separações de fase”. Em conversa com os técnicos, a primeira resposta, e eles foram contundentes, era que isso fora gerado devido à umidade absorvida pela amostra. Pois o policarbonato absorve uma grande quantidade de umidade, e essas marcas são recorrentes neste tipo de situação. Contudo, para o segundo processamento, as matérias primas foram secas a 100°C por 6h, em um equipamento com maior eficiência que o normalmente utilizado. Portanto ainda é cogitada a hipótese de a homogeneização do material virgem e do reciclado não ter sido eficiente na rosca da injetora, indicando a necessidade de um estudo aprofundado no que tange ao processamento desta mistura de Policarbonato virgem e reciclado na proporção de 50% de cada.

### **4.3. Ensaios mecânicos**

#### **4.3.1. Tração**

Com o ensaio de tração foi possível obter dados como Módulo de Young, Tensão de Ruptura, deformação e indícios de tenacidade.

Na Tabela 5 é possível visualizar tais parâmetros, bem como sua média e desvio padrão.

Tabela 5: Resultado ensaio de Tração do Policarbonato reciclado 50%

CP	Força Ruptura(N)	TS (N/mm <sup>2</sup> )	desl Rupt(mm)	Força maxima (N)	tensão max (N/mm <sup>2</sup> )
1	2076,6	48,0693	9,17163	2626,46	60,7977
2	1949,29	45,1224	11,2834	3638,76	61,0824
3	1923,07	44,5156	10,3806	2642,67	61,1730
4	1922,75	44,5080	11,585	2617,33	60,5863
5	1906,33	44,1279	10,794	2602,04	60,2325
6	1965,67	45,5017	8,8735	2608,63	60,3849
7	2142,93	49,6048	8,86138	2628,43	60,8433
8	1881,53	43,5540	11,4806	2617,44	60,5889
9	1968,16	45,5594	3,50875	1969,24	45,5843
10	1940,25	44,9132	9,97663	2616,39	60,5646
média	1967,66	45,5476	9,5915	2656,7390	59,1838
desv pad	80,87	1,87	2,38	401,24	4,79

Durante o ensaio, o Corpo de Prova de número 9 sofreu uma ruptura inesperada, como pode ser verificado na **Figura 25**, na região onde é segurado pela garra na maquina de ensaio.



Figura 25: Corpos de prova após Ensaio de Tração

Portanto a análise foi feita novamente excluindo tal ponto. O resultado é visualizado na

**Tabela 6**

**Tabela 6: Resultado recalculado sem o Corpo de Prova 9**

CP	Força Ruptura(N)	TS (N/mm <sup>2</sup> )	desl Rupt(mm)	Força máxima (N)	tensão max (N/mm <sup>2</sup> )
1	2076,6	48,0693	9,17163	2626,46	60,7977
2	1949,29	45,1224	11,2834	3638,76	61,0824
3	1923,07	44,5156	10,3806	2642,67	61,1730
4	1922,75	44,5080	11,585	2617,33	60,5863
5	1906,33	44,1279	10,794	2602,04	60,2325
6	1965,67	45,5017	8,8735	2608,63	60,3849
7	2142,93	49,6048	8,86138	2628,43	60,8433
8	1881,53	43,5540	11,4806	2617,44	60,5889
10	1940,25	44,9132	9,97663	2616,39	60,5646
média	1967,60	45,5463	10,2674	2733,1278	60,6948
desv pad	85,78	1,99	1,10	339,82	0,31

A partir da análise de ambas as tabelas é possível notar coerência na Tensão máxima alcançada por tal material, bem como na Tensão de ruptura. Ao excluir o resultado do corpo de prova problemático, um desvio padrão de 0,32 é alcançado para a tensão máxima, o que indica uma grande estabilidade e homogeneidade do material e do processamento.

Os diagramas tensão deformação podem ser vistos no Anexo E, e apresentam todas as etapas típicas do ensaio: a zona elástica, a zona plástica até ruptura do Corpo de prova.

Evidenciando assim, o comportamento de elevada Tensão de Ruptura, típico do policarbonato, contudo é muito inferior ao apresentado pelo policarbonato virgem.

Com os valores médios foi calculado o Modulo de Young e a deformação em porcentagem, obtendo os valores apresentados na **Tabela 7**, conjuntamente com os dados do policarbonato virgem obtidos na literatura.



Tabela 7: comparação dos dados obtidos por tração do PC Reciclado com os do PC virgem do programa CES

	E (GPa)	TS (Mpa)	$\epsilon$ %	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
<b>PC reciclado</b>	6,81	45,55	10,7	1050
<b>PC Virgem</b>	2,32 – 2,44	62,7 – 72,4	110 - 120	1190 - 1210

É possível notar que o modulo de Young aumentou, resultando em um material com maior rigidez que o virgem, portanto, diminuindo sua elongação. Esse aumento na rigidez do PC pode ser considerado uma desvantagem, visto que é um polímero conhecido por sua boa resistência mecânica. Esses dados serão complementados com o ensaio de Impacto.

#### 4.3.2. Impacto

No ensaio de impacto foram obtidas as energias absorvidas até o rompimento do corpo de prova. Tais energias são apresentadas na **Tabela 8**

Tabela 8: Dados obtidos através do Ensaio de Impacto Izod

cp	entalhe	Re kJ/m <sup>2</sup>
<b>1</b>	10,5	11,27
<b>2</b>	10,6	9,2
<b>3</b>	10,8	8,98
<b>4</b>	11	7,61
<b>5</b>	10,7	8,82
<b>6</b>	10,7	7,1
<b>7</b>	10,5	9,24
<b>8</b>	10,5	10,17
<b>9</b>	10,42	9,26
<b>10</b>	10,14	9,99

<b>média</b>	10,586	9,164
<b>desv pad</b>	0,233819	1,200604

Através deste ensaio, obteve-se uma absorção de 9,164 kJ/m<sup>2</sup> como média. Segundo Ashby (CES, 2013), o Policarbonato virgem absorve 69,7 – 102 kJ/m<sup>2</sup> através do ensaio de impacto Izod com entalhe a 23°C. Contudo, como pode ser visualizado na Tabela 1 a literatura apresenta um dado de absorção igual a 12 kJ/m<sup>2</sup>, apresentado por (Dumont, 2007).

Portanto é possível reafirmar o que havia sido explanado anteriormente: que este teste é muito incerto e pode não servir de grande impacto na seleção de um material para um projeto.

#### 4.4. Comparação

Para fins de comparação, o software CES foi usado para efetuar análises entre o Policarbonato Reciclado 50% e outros materiais disponíveis no mercado.

Para fazer a comparação entre os materiais o primeiro passo foi medir o volume e a massa de um dos Corpos de Prova, obtendo a densidade do material, que foi igual a 1050 kg/m<sup>3</sup>.

Para iniciar a comparação e a pesquisa, o material criado foi situado dentre os outros disponíveis no software, de uma forma geral, num gráfico que traça o Módulo de Young pela Densidade dos materiais. A figura 6 mostra esta situação.

Após, ao utilizar o CES, os dados do Policarbonato reciclado 50% foram adicionados no programa e o material criado foi situado dentre os outros disponíveis no software, o qual pode se visualizado como uma elipse laranja. Então foi feita a comparação com outros materiais.

Sucessivos estágios de seleção/comparação foram feitos e o seguinte gráfico comparativo foi criado, visto na Figura 26. De acordo com o software, o novo material é comparado com muitos materiais naturais, compósitos, polímeros, entre outros.

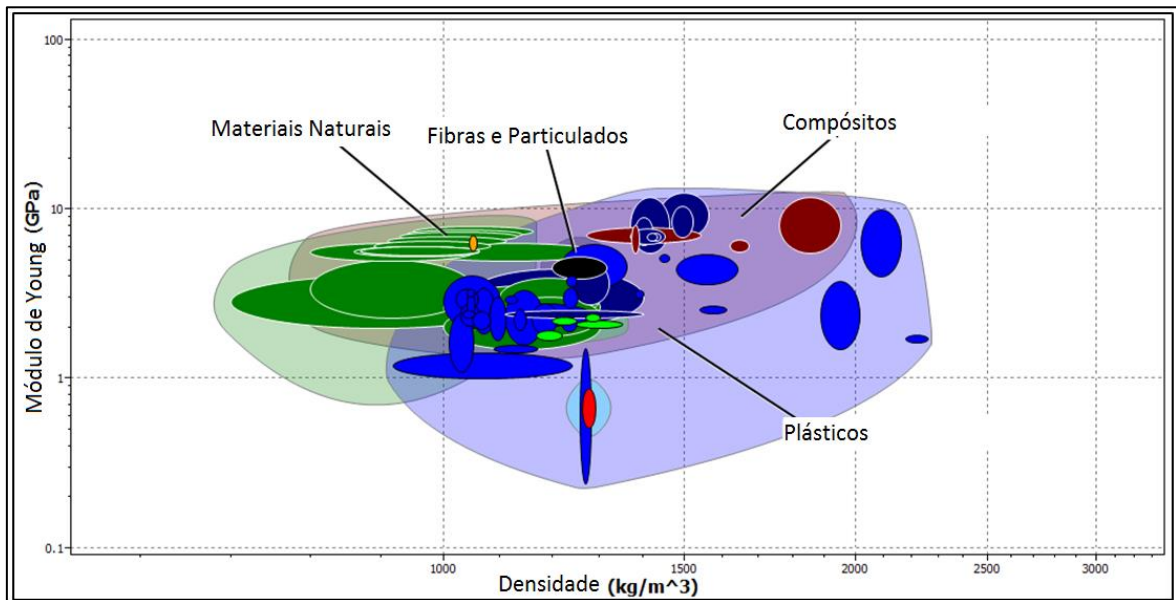


Figura 26: Gráfico obtido com o Software CES, traduzido

O Policarbonato Reciclado 50% apresenta propriedades muito similares a diversos outros materiais, principalmente o ABS e suas variações, como pode ser visto na **Tabela 9**, obtida nesta etapa.

Tabela 9: Materiais passíveis de substituição pelo Policarbonato Reciclado 50% em relação às propriedades mecânicas

ABS (40% aluminum flake)
ABS (6% stainless steel fiber)
ABS (7% stainless steel fiber)
ABS (flame retarded, molding and extrusion)
ABS (heat resistant, injection molding)
ABS (high-impact, injection molding)
ABS (medium-impact, injection molding)
EC (molding compound)
Epoxy resin (unfilled)
MF (alpha cellulose filled, modified)

MF (woodflour filler)
Oak (quercus virginiana) (t)
PE (crosslinked, molding)
PF (cellulose filled, impact modified, molding)
PF (fabric and rag filled, impact modified, molding)
PF (woodflour and mineral filled, molding)
PF (woodflour filled, molding)
PMMA (impact modified)
Policarbonato Reciclado 50%
Polyester BMC (7-10% glass fibre)
Polyester cast (rigid)
Polyester SMC (30% glass fibre, slow-burning, low density)
POM (copolymer, 10-30% mineral)
PP (copolymer, 20% glass fiber)
PP (homopolymer, 20% mica)
PP (homopolymer, 30% talc)
PPO/PS alloy (40% aluminum flake)
Satinwood (t)
SMA (impact modified)
SMMA (ethyl acrylate terpolymer)
UF (alpha cellulose filler)
Wool

Esses materiais exibem propriedades mecânicas similares ao material obtido por reciclagem.

A substituição destes materiais pelo Policarbonato Reciclado 50% pode ser estudada levando em conta outros parâmetros como processo de fabricação, exigências do projeto no que tangem a outras propriedades, e custo tanto de material como de processo de produção.

Uma tentativa de avaliação no que concerne ao preço poderia ser feita, contudo o valor dado ao Policarbonato Reciclado 50% não é preciso, e uma extensa pesquisa no campo de custo da matéria prima necessita ser feita. Além desse custo é importante um custo do processamento ser feito, pois o processamento do Policarbonato é bem complicado, podendo exigir um maquinário mais robusto que para os materiais convencionais.

## 5. Conclusão

A partir dos estudos e processos realizados nos óculos advindos das apreensões da Polícia Federal foi constatado que tal policarbonato é um material de difícil trabalhabilidade. Apresenta alta viscosidade, exigindo assim, temperaturas e pressões de processamento altas e não corriqueiras. Tal fato pode apontar dificuldades elevadas para viabilização deste processo, contudo esse trabalho permite afirmar que a reciclagem via injeção é tecnicamente possível. O encarecimento pode ser proveniente da necessidade de maquinário robusto, elevado gasto de energia e mão-de-obra especializada. Porém o custo da matéria-prima pode compensar tal investimento, portanto o aprofundamento de tal estudo faz-se necessário para avaliar tal observação.

Com relação às propriedades mecânicas do material reciclado foi possível notar forte diferença, através dos ensaios realizados, nas propriedades do material reciclado quando comparado aos dados do material virgem presentes no banco de dados do CES. Esse fato já era esperado em função de ser um comportamento típico no processo de reciclagem. Essa pode ser uma explicação do porquê de não se reciclar com frequência o policarbonato. Contudo as características levantadas (propriedades do reciclado) ainda se apresentam plausíveis, conferindo ao produto final um desempenho satisfatório para certos usos.

Já no que tange à comparação deste material com os materiais que possuem propriedades semelhantes através do Software CES 2013, verificou-se uma grande gama de materiais que podem vir a ser substituídos. Tal substituição deve levar em conta o custo dos materiais e o seu processamento.

Finalmente, é possível afirmar que os testes para contribuição de futuro processo de reciclagem foi executado com sucesso e o material obtido apresenta propriedades

mecânicas semelhantes a diversos materiais disponíveis no mercado, podendo ser o Policarbonato Reciclado 50% o substituto destes, promovendo um menor custo e desenvolvimento mais sustentável.

## **6. Sugestão de trabalhos futuros**

- Realizar outras caracterizações do produto reciclado, tais como propriedades térmicas, temperaturas características e dureza.
- Estudar os custos energéticos do reprocessamento para caracterizar as emissões de carbono.
- Avaliar a viabilidade econômica de tal reciclagem.
- Aproveitar os estudos para realizar projetos de produtos que sejam possíveis dadas as propriedades listadas neste trabalho.
- Produzir corpos de prova com o Policarbonato virgem utilizado e ensaiar nas mesmas condições para comparar as propriedades com o material reciclado.

## 7. Bibliografia

- Abiplast. (2013). <http://www.abiplast.org.br/abiplast>. Acesso em 02 de Outubro de 2014, disponível em Abiplast - Associação Brasileira da Indústria do Plástico: [http://file.abiplast.org.br/download/links/abiplast\\_coletiva\\_de\\_imprensa\\_2013.pdf](http://file.abiplast.org.br/download/links/abiplast_coletiva_de_imprensa_2013.pdf)
- Ashby, M. (2010). *MAterials and Design - The Art and Science of Material Selection in Product Design*. Toronto: Ed Elsevier.
- Ashby, M. (2013). Cambridge Engineering Selector, Software.
- Cândido, L. H. (2011). *Estudo do ciclo de reciclagem de materiais em blendas Acrilonitrila-Butadieno-Estireno/Polycarbonato. Tese de Doutorado*. Porto Alegre: UFRGS Editora.
- Canevarolo, S. (2007). *Técnicas de Caracterização de polímeros*. São Paulo: Artliber.
- Canevarolo, S. (2010). *Ciência dos Polímeros, um texto básico para tecnólogos e engenheiros* (3º ed.). São Paulo: Artliber.
- Defferrari, C. (22 a 26 de setembro de 2013). RECICLABILIDADE DO POLICARBONATO: AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DO MATERIAL DECORRENTE DE REPROCESSAMENTO POR EXTRUSÃO E INJEÇÃO. 12ºCBPol. Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.
- Dias, M. (2009). *Percepção dos materiais pelos usuários: modelo de avaliação Permatius; Tese de Doutorado*. Florianópolis: UFSC Editora .
- Dumont, J.-m. (2007). Polycarbonates. *Techniques de l'ingénieur*, AM 3 381 1 - AM 3 381 - 12.

G1. (10 de outubro de 2013). *G1*. Acesso em 16 de outubro de 2014, disponível em [g1.globo.com: http://g1.globo.com/bemestar/noticia/2013/10/oculos-piratas-que-representam-41-das-vendas-atrasam-diagnostico.html](http://g1.globo.com/bemestar/noticia/2013/10/oculos-piratas-que-representam-41-das-vendas-atrasam-diagnostico.html)

Goodship, V. (2007). Plastic recycling. *Science Progress*, 245-268.

LeGrand, D. G. (2000). *Handbook of Polycarbonate Science and Technology*. New York: Marcel Dekker Inc.

Manrich, S. (2005). *Processamento de Termoplásticos - Rosca única, Extrusão e Matrizes, Injeção e Moldes*. São Paulo: Artiliber Editora.

Pardos, F. (2012). Polycarbonates - Aspects économiques. *Techniques de l'ingénieur*, AM 3 382v2 1 - AM 3 382v2 4 .

Receita Federal. (6 de julho de 2011). *Portaria RFB nº 3.010, de 29 de junho de 2011*. Acesso em 16 de Outubro de 2014, disponível em <http://www.receita.fazenda.gov.br>: <http://www.receita.fazenda.gov.br/legislacao/portarias/2011/portrfb30102011.htm>

Receita Federal. (2013). *receita.fazenda.gov.br*. Acesso em 16 de outubro de 2014, disponível em [Receita Federal: http://www.receita.fazenda.gov.br/publico/destinacaoMercadorias/MercadoriasApreendidas/RelatorioAduaneiro2013.pdf](http://www.receita.fazenda.gov.br)

Sant'Anna, J. (16 de fevereiro de 2008). *Plástico*. Acesso em 2016 de outubro de 2014, disponível em <http://www.plastico.com.br>: <http://www.plastico.com.br/plastico/plastico/plasticos-nos-oculos-sucedaneo-do-vidro-nas-lentes-o-plastico-avanca-a-olhos-vistos-nas-armacoes/>



Siddique, R. (2008). Use of recycled plastic in concrete: A review. *Waste Management*, 1835–1852.

Smart Oculos. (s.d.). *Smart Oculos*. Acesso em 16 de Outubro de 2014, disponível em <http://smartoculos.com.br/>: <http://smartoculos.com.br/novidades/voce-conhece-cada-parte-do-seus-oculos/>

Vidales, L. (2013). *Contribuição ao Ecodesign (DfE) a partir de propriedades de blendas PC/PMMA em sucessivos ciclos de processamento: estudo de caso de oculos oriundos de apreensão da Receita Federal do Brasil. Dissertação de Mestrado*. Porto Alegre: UFRGS editora.

Watanabe, M. (2009). Chemical recycling of polycarbonate in high pressure temperature steam at 573 K. *Polymer Degradation and Stability*, 2157 - 2162.

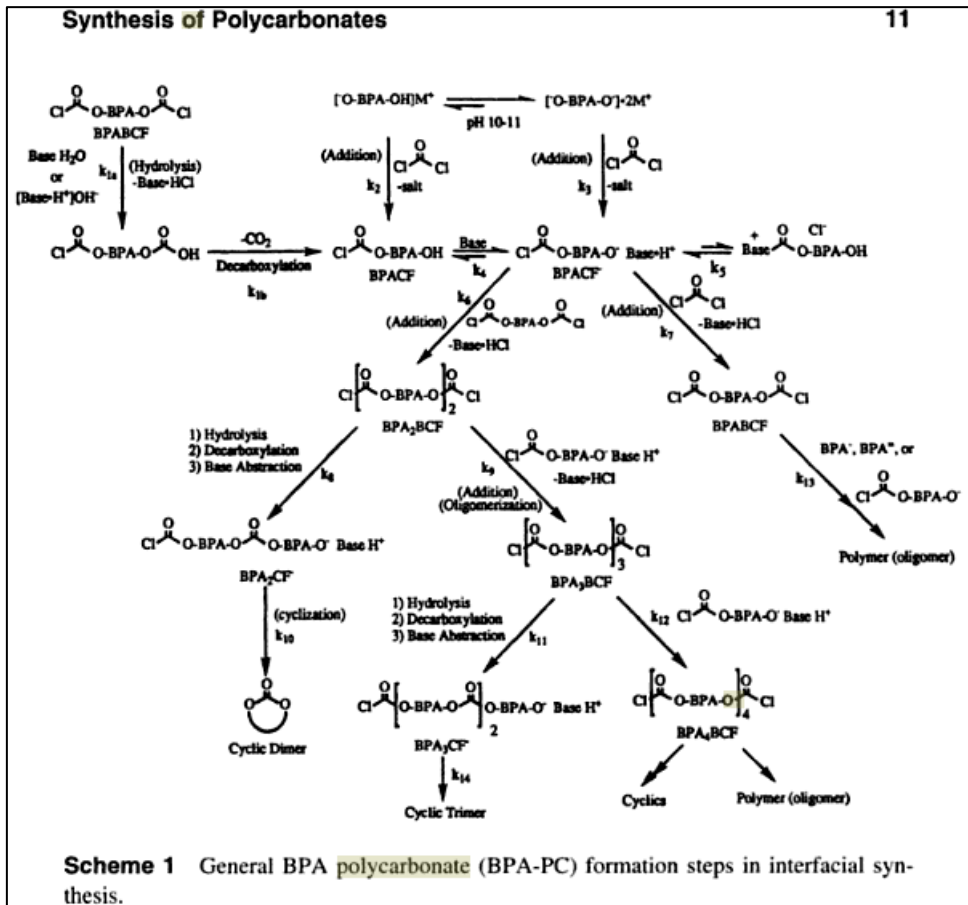
Wikipedia. (1 de janeiro de 2014). *Wikipédia, the free encyclopedia*. Acesso em 10 de novembro de 2014, disponível em <http://en.wikipedia.org/>: <http://en.wikipedia.org/wiki/Polycarbonate>

Zanin, M. (2004). *Resíduos Plásticos e Reciclagem - Aspectos Gerais e Tecnologia*. São Carlos: EdUFSCar.



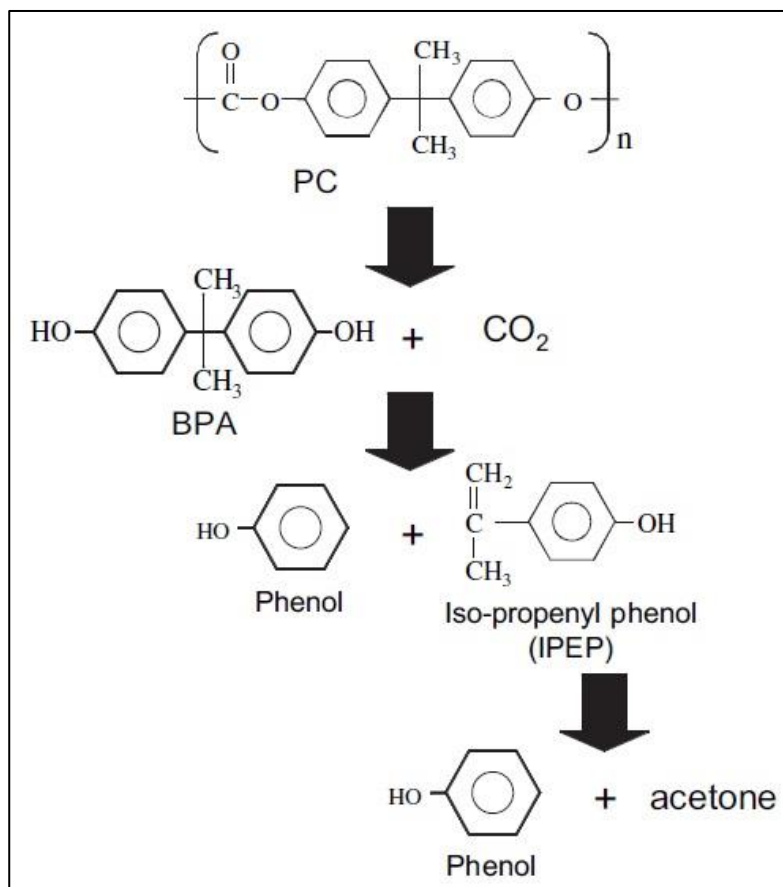
## 8. Anexos

### Anexo A



(LeGrand, 2000)

Anexo B



Reação química de decomposição do Policarbonato em seus monômeros. (Watanabe, 2009)

## PC (high viscosity, molding and extrusion)

### Identification

#### Designation

Polycarbonate (High Viscosity, Unfilled, Molding and Extrusion)

#### Tradenames

Alcom; Alfacarb; Anjalon; Astalon; AxxisPC; Azloy; Barlo; Beetle; Calibre; CarboGlass; Carbotex; Cyrolon; Dafneloy; Daitoplex; Decarglas; Diaterm; Durmax; Durolon; Dynacom; Ecocarb; Edgetek; Emerge; Ensicar; Forex; Hiloy; Hygard; Hylex; Hynsin; Hyzod; Iupilon; Iupon; Karbolon; Kobaloy; Koplá; Latilon; Lexan; Lubrilon; Lupoy; Luvocom; Makroclear; Makrofol; Makrolon; Markoblend; Maxxam; Megarad; Monogal; Multilon; Navalloy; Naxell; Nirion; Novamate; Novarex; Nyloy; Palsafe; Panlite; Paramighty; PCLight; Perlex; Permastat; Pokalon; Polygal; Polyman; Remex; RowTec; Scantec; SDPolyca; Seracarb; Sewon Glas; Shinite; Signature; Sinvet; Sitralon; Stapron; Staren; Staroy; Stella; Sungal; Sustanat; Tarolon; Tecanat; Teklon; Tekulon; Terez; TismoPoticon; Trirex; Tuffak; Ty nec; Ultratuf; Vampcarb; Wonderlite; Zelux

### General Properties

Density	1.19e3	-	1.21e3	kg/m <sup>3</sup>
---------	--------	---	--------	-------------------

Price	* 8.38	-	9.22	BRL/kg
-------	--------	---	------	--------

### Composition overview

#### Composition (summary)

Polycarbonate homopolymer of bis-phenol A (BPA):  $(OC_6H_4C(CH_3)_2C_6H_4OC=O)_n$ . High viscosity grades have higher molecular weight, are less processable but more tough.

Base	Polymer
------	---------

Polymer class	Thermoplastic : amorphous
Polymer type	PC
Polymer type full name	Polycarbonate
Filler type	Unfilled

### Composition detail (polymers and natural materials)

Polymer	100	%
---------	-----	---

### Mechanical properties

Young's modulus	2.32	-	2.44	GPa
Compressive modulus	2.35	-	2.47	GPa
Flexural modulus	2.27	-	2.34	GPa
Shear modulus	* 0.829	-	0.872	GPa
Bulk modulus	* 3.83	-	4.03	GPa
Poisson's ratio	* 0.391	-	0.407	
Shape factor	4.6			
Yield strength (elastic limit)	59.1	-	65.2	MPa
Tensile strength	62.7	-	72.4	MPa
Compressive strength	* 69	-	86.2	MPa
Flexural strength (modulus of rupture)	86.2	-	93.1	MPa
Elongation	110	-	120	% strain
Hardness - Vickers	* 17.7	-	19.6	HV
Hardness - Rockwell M	70	-	75	

Hardness - Rockwell R	* 104	-	115	
Fatigue strength at 10 <sup>7</sup> cycles	* 23.7	-	30.8	MPa
Fracture toughness	2.1	-	2.3	MPa.m <sup>0.5</sup>
Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 0.0164	-	0.0172	

### Impact properties

Impact strength, notched 23 °C	69.7	-	102	kJ/m <sup>2</sup>
Impact strength, notched -30 °C	12.6	-	15	kJ/m <sup>2</sup>
Impact strength, unnotched 23 °C	590	-	600	kJ/m <sup>2</sup>
Impact strength, unnotched -30 °C	590	-	600	kJ/m <sup>2</sup>

### Thermal properties

Glass temperature	142	-	158	°C
Heat deflection temperature 0.45MPa	138	-	142	°C
Heat deflection temperature 1.8MPa	121	-	132	°C
Maximum service temperature	* 104	-	119	°C
Minimum service temperature	-47	-	-37	°C
Thermal conductivity	0.189	-	0.205	W/m.°C
Specific heat capacity	1.15e3	-	1.25e3	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	120	-	125	µstrain/°C

### Processing properties

Linear mold shrinkage	0.5	-	0.7	%
Melt temperature	226	-	322	°C

Mold temperature	70	-	100	°C
Molding pressure range	69	-	138	MPa

### Electrical properties

Electrical resistivity	1e20	-	1e21	μohm.cm
Dielectric constant (relative permittivity)	3.1	-	3.3	
Dissipation factor (dielectric loss tangent)	8.6e-4	-	9.4e-4	
Dielectric strength (dielectric breakdown)	* 16	-	19.2	MV/m
Comparative tracking index	175	-	325	V

### Optical properties

Refractive index	1.58	-	1.59	
Transparency	Optical quality			

### Absorption, permeability

Water absorption @ 24 hrs	0.135	-	0.165	%
Water vapor transmission	1.1	-	2.05	g.mm/m <sup>2</sup> .day
Permeability (O <sub>2</sub> )	91.6	-	105	cm <sup>3</sup> .mm/m <sup>2</sup> .day.atm

### Durability: flammability

Flammability	Slow-burning
--------------	--------------

### Durability: fluids and sunlight

Water (fresh)	Excellent
Water (salt)	Excellent



Weak acids	Excellent
Strong acids	Excellent
Weak alkalis	Acceptable
Strong alkalis	Unacceptable
Organic solvents	Limited use
UV radiation (sunlight)	Fair
Oxidation at 500C	Unacceptable

### **Primary material production: energy, CO2 and water**

Embodied energy, primary production	* 103	- 114	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	* 5.74	- 6.35	kg/kg
Water usage	* 165	- 182	l/kg

### **Material processing: energy**

Polymer extrusion energy	* 5.82	- 6.43	MJ/kg
Polymer molding energy	* 18.7	- 20.6	MJ/kg
Coarse machining energy (per unit wt removed)	* 1.09	- 1.2	MJ/kg
Fine machining energy (per unit wt removed)	* 6.58	- 7.27	MJ/kg
Grinding energy (per unit wt removed)	* 12.7	- 14	MJ/kg

### **Material processing: CO2 footprint**

Polymer extrusion CO2	* 0.437	- 0.483	kg/kg
Polymer molding CO2	* 1.4	- 1.55	kg/kg
Coarse machining CO2 (per unit wt removed)	* 0.0814	- 0.09	kg/kg

Fine machining CO2 (per unit wt removed)	* 0.494	-	0.546	kg/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	* 0.951	-	1.05	kg/kg

### Material recycling: energy, CO2 and recycle fraction

Recycle	True			
Embodied energy, recycling	* 35	-	38.7	MJ/kg
CO2 footprint, recycling	* 1.95	-	2.16	kg/kg
Recycle fraction in current supply	0.672	-	0.742	%
Downcycle	True			
Combust for energy recovery	True			
Heat of combustion (net)	* 30.3	-	31.8	MJ/kg
Combustion CO2	* 2.7	-	2.84	kg/kg
Landfill	True			
Biodegrade	False			
A renewable resource?	False			

### Notes

#### Typical uses

Safety shields and goggles; lenses; glazing panels; business machine housing; instrument casings; lighting fittings; safety helmets; electrical switchgear; laminated sheet for bullet-proof glazing; twin-walled sheets for glazing; kitchenware and tableware; microwave cookware, medical (sterilizable) components.

### Links

ProcessUniverse

Producers

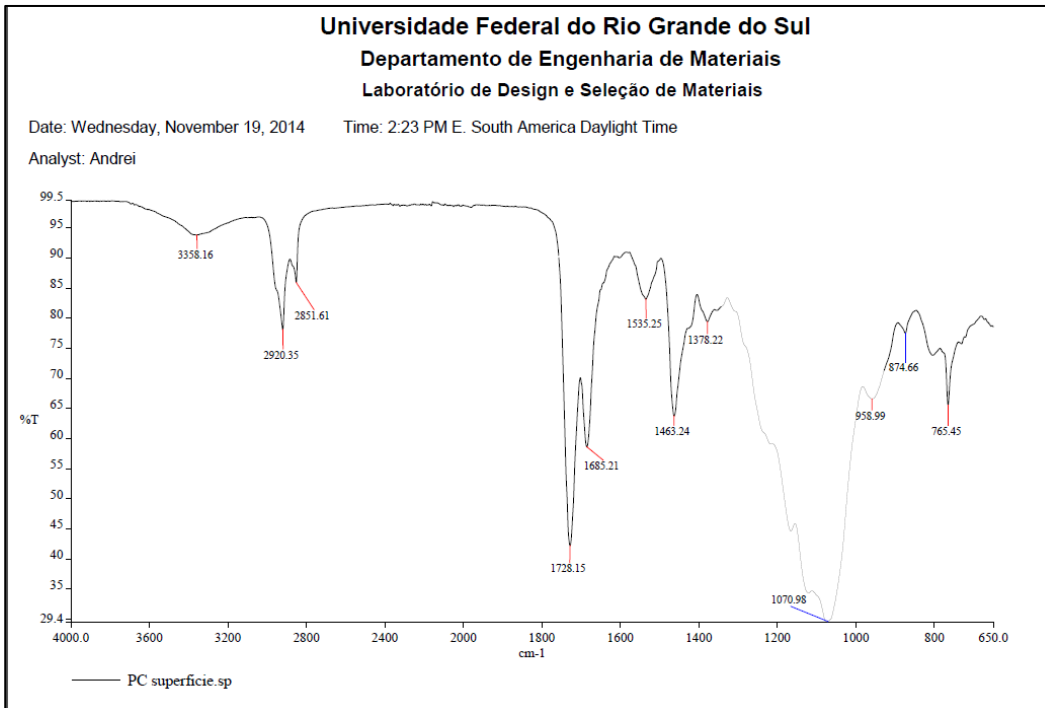
Reference

Shape

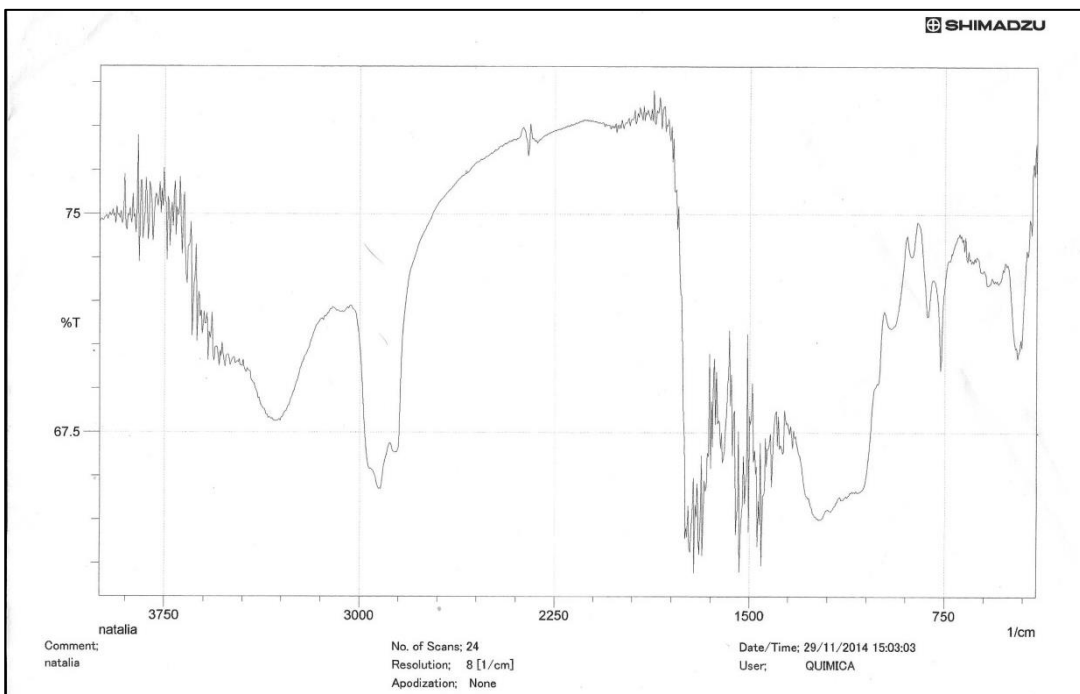
Values marked \* are estimates.

No warranty is given for the accuracy of this data

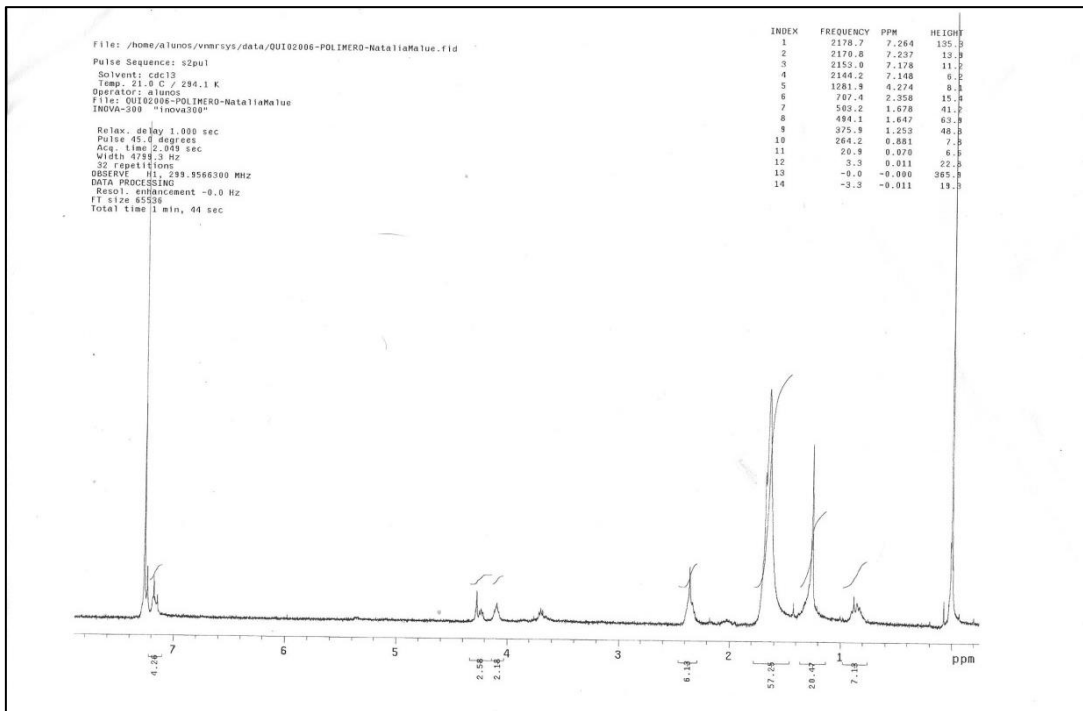
## Anexo D



IR- ATR feito na superfície do óculos, equipamento do LdSM



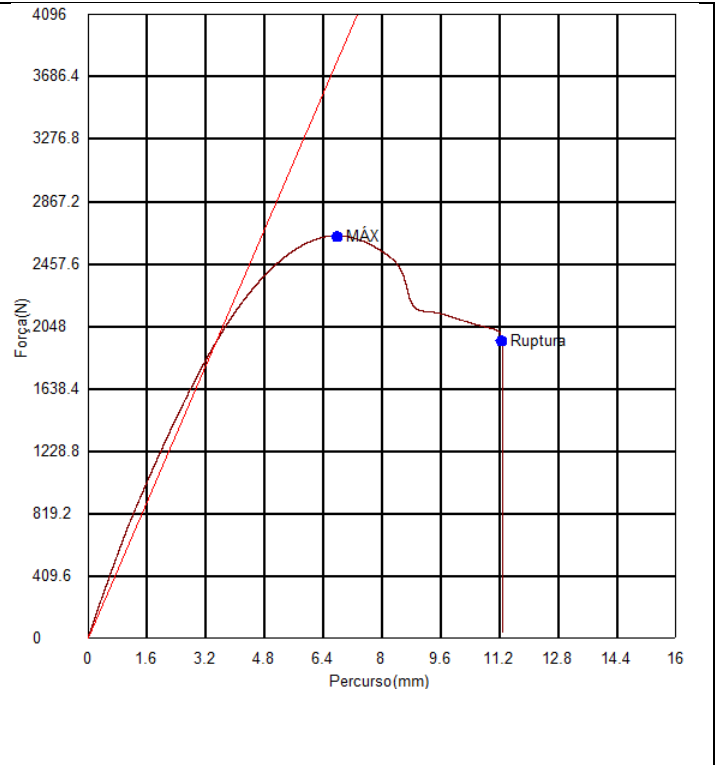
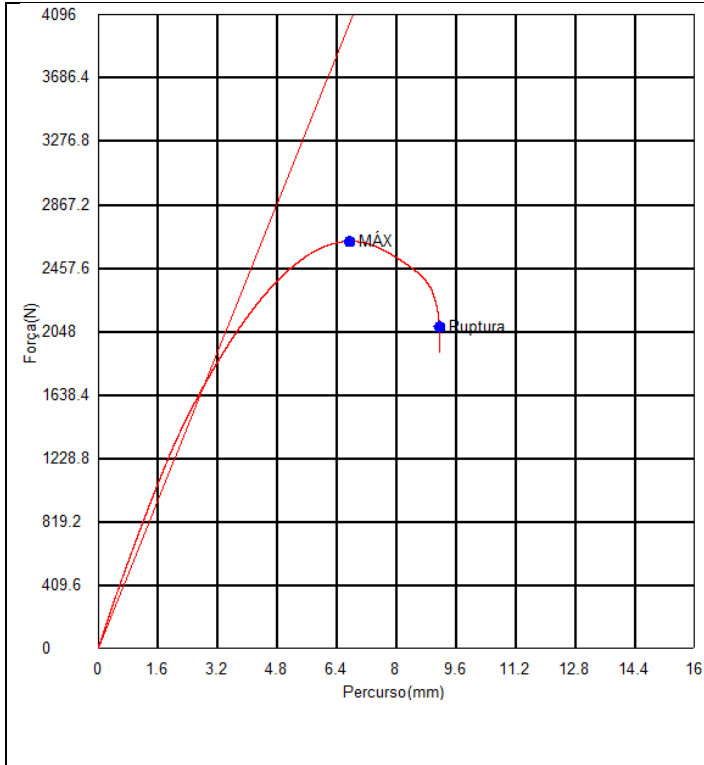
FTIR do filme que reveste o óculos feito no Instituto de Química



RMN de H<sup>1</sup> do filme que reveste o óculos feito no Instituto de Química

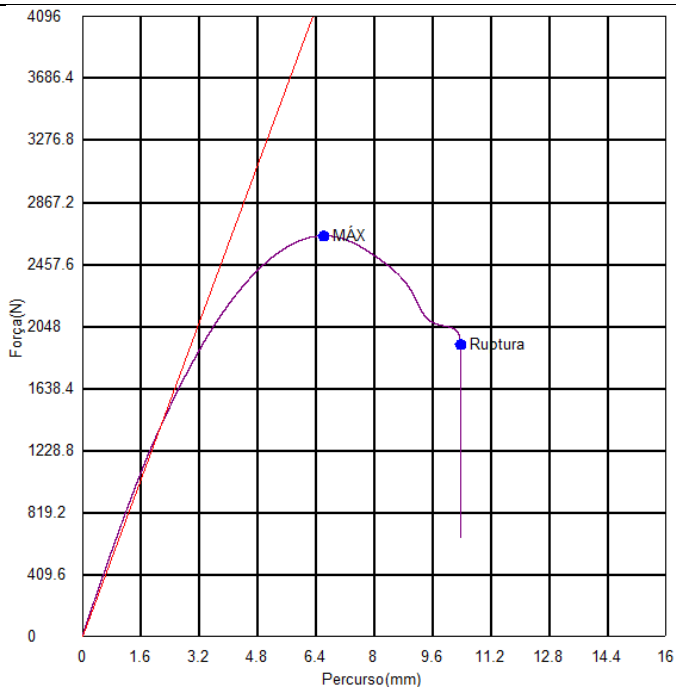
# Anexo E

## Curvas tensão deformação dos 10 Corpos de Prova

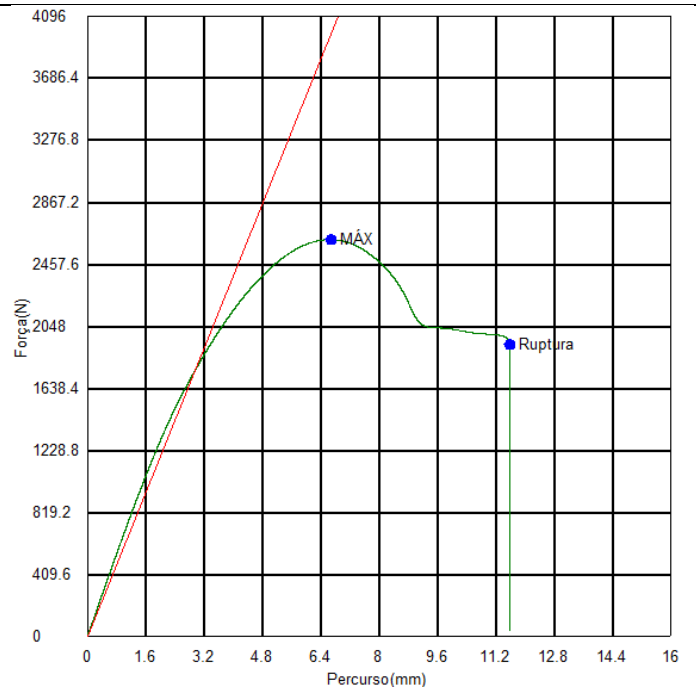


Corpo de Prova 1

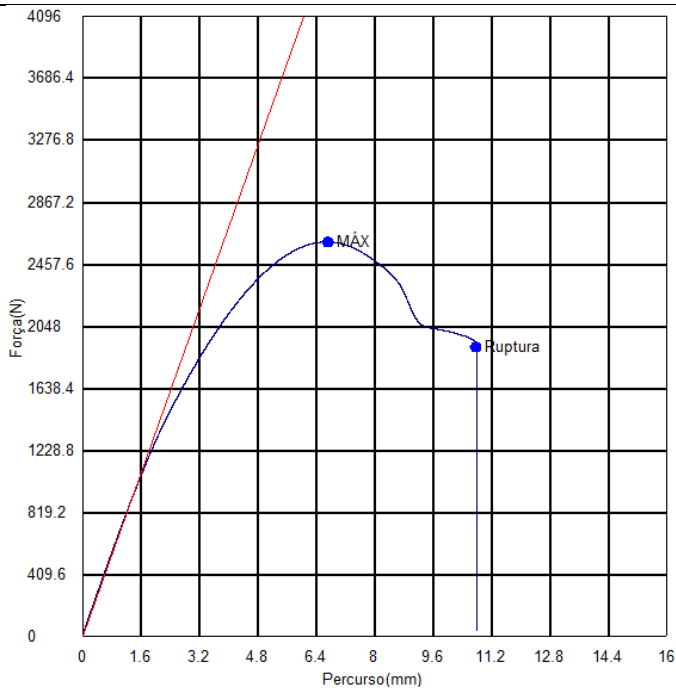
Corpo de Prova 2



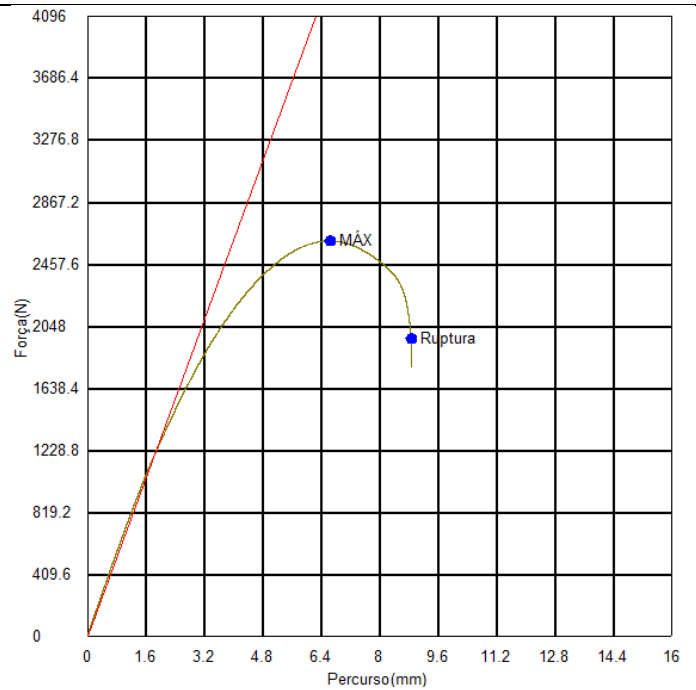
Corpo de Prova 3



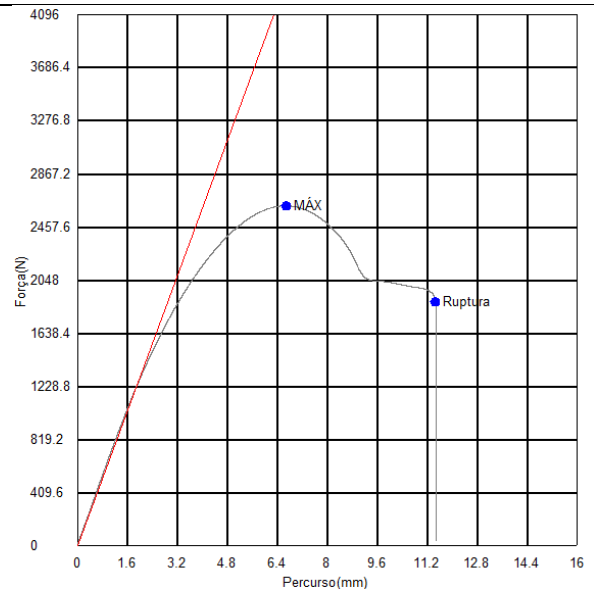
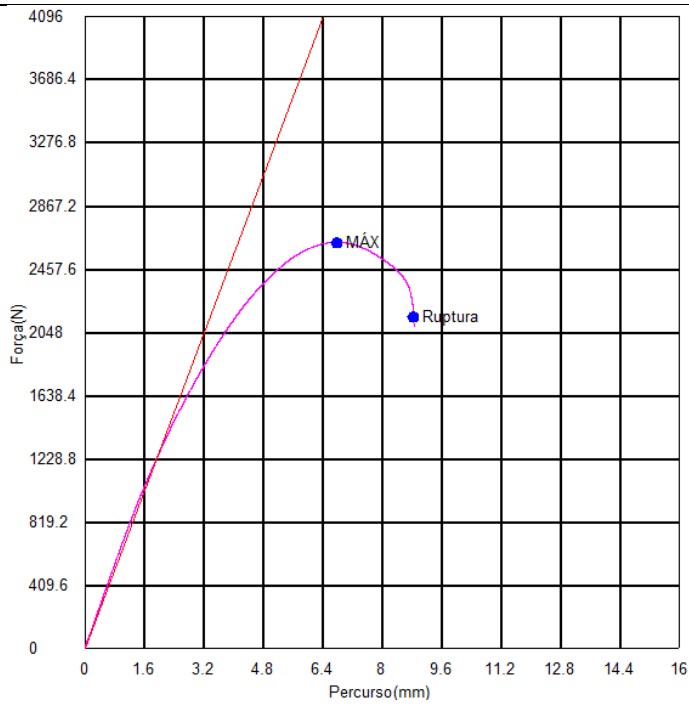
Corpo de Prova 4



Corpo de Prova 5

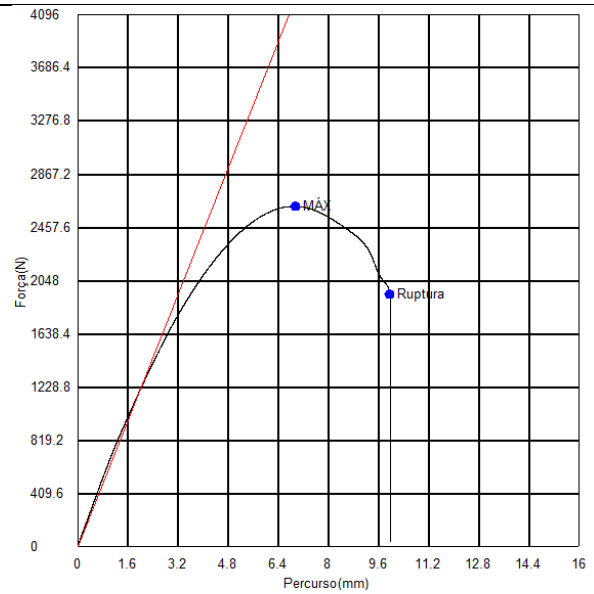
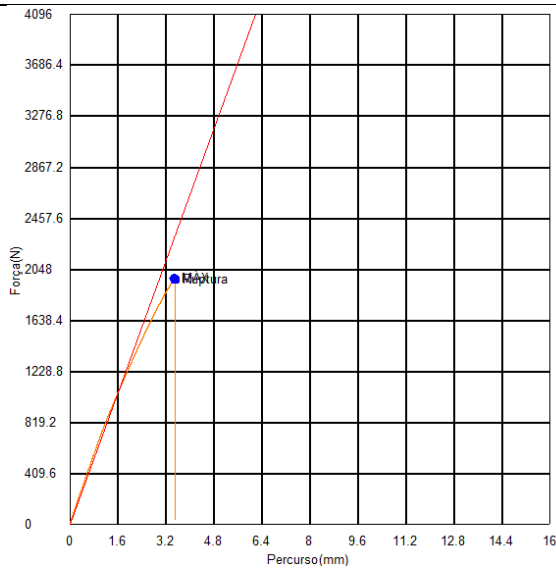


Corpo de Prova 6



Corpo De prova 7

Corpo de Prova 8



Corpo de Porva 9

Corpo de Porva 10



