UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS

" Confecção de Lentes Acrílicas para o Ensino de Ótica"

Renato Antonio Cruz

*Dissertação apresentada ao Instituto
de Física de São Carlos,
Universidade de São Paulo, para a
obtenção do título de Mestre em
Ciências- Física Aplicada .*

ORIENTADOR: Prof. Dr. Euclides Marega Junior

SÃO CARLOS

1997

Cruz, Renato Antonio

Confecção de lentes acrílicas para o ensino de ótica/Renato Antonio Cruz.--São Carlos, 1997.

65 p.

Dissertação (Mestrado)--Instituto de Física de São Carlos, 1997.

Orientador: Prof. Dr. Euclides Marega Junior

1. Lentes acrílicas. 2. Instrumentação para Ensino de Ótica
I. Título.

UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO

Instituto de Física de São Carlos

Av. Dr. Carlos botelho, 1465
CEP 13560-250 - São Carlos - SP
Brasil

Fone (016) 274-3444

Fax (016) 272-2218

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE
RENATO ANTÔNIO CRUZ APRESENTADA AO INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS,
DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, EM 23 DE JULHO DE 1997.

COMISSÃO JULGADORA:

Prof. Dr. Euclides Marega Júnior/IFSC-USP

Prof. Dr. Sérgio Carlos Zilio/IFSC-USP

Prof. Dr. José Joaquim Lunazzi/UNICAMP

A Deus, o Criador,
pelo dom da vida.

À minha família,
pela compreensão e pelo apoio.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Euclydes Marega Junior, meu orientador, pela dedicação em orientar, e pela confiança e amizade depositadas em mim.

Ao Luiz Henrique Ferreira, pela inestimável contribuição a este trabalho.

Aos técnicos Caetano Almicar Verzola, Nelson A. Barbosa, Sidnei Ap. Gonzalez, pela grande ajuda e pelo apoio técnico.

A toda a equipe de funcionários e colegas de trabalho do CDCC que, de maneira direta ou indireta, contribuiu para a realização deste trabalho.

A todos os meus amigos que com carinho me apoiaram.

SUMÁRIO

RESUMO.....	I
ABSTRACT.....	II
I - INTRODUÇÃO.....	1
II - PROPRIEDADES FÍSICAS DOS PLÁSTICOS ÓTICOS.....	3
II.1 - Principais Plásticos Óticos.....	4
II.1.1 - Acrílico.....	4
II.1.2 - Poliestireno.....	5
II.1.3 - NAS.....	5
II.1.4 - Policarbonato.....	6
II.1.5 - CR-39.....	6
II.2 - Propriedades Físicas.....	7
II.2.1 - Transmitância.....	7
II.2.2 - Índice de refração.....	9
II.2.3 - Densidade.....	12
II.2.4 - Impacto; abrasão; ataque químico; anti-estático.....	12
II.2.5 - Temperaturas Características e Expansão Térmica.....	13
III - PLÁSTICOS.....	16
III.1 - Introdução.....	16
III.2 - Classificação dos Polímeros.....	18
III.3 - Estruturas e Estados Físicos dos Polímeros.....	20
III.4 - Técnicas de Polimerização.....	22
III.5 - Preparação do Material.....	24

III.6 - Processos de Moldagem.....	27
III.7 - Confeção de Lentes Plásticas.....	29
IV - O PROCESSO DE MOLDAGEM UTILIZADO.....	31
IV.1 - A Escolha do Processo.....	31
IV.2 - Projeto da Máquina.....	32
IV.3 - Procedimento.....	35
IV.3.1 - Corte do Material.....	36
IV.3.2 - O Aquecimento do Material.....	38
IV.3.3 - A Moldagem por Compressão.....	40
V - CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL UTILIZADO.....	44
V.1 - Peso Molecular.....	44
V.2 - Índice de Refração e Valor de Abbe.....	46
V.3 - Transmissão de Luz.....	47
V.4 - Temperaturas de Moldagem.....	48
VI - PROPRIEDADES ÓTICAS DAS LENTES MOLDADAS.....	52
VI.1 - Medida do Raio de Curvatura.....	52
VI.2 - Aberrações Esféricas.....	52
VI.3 - Birrefringência Induzida por "Stress".....	57
VI.4 - Qualidade da Superfície Moldada.....	60
VII - CONCLUSÕES E NOVAS PROPOSTAS.....	61
VIII-BIBLIOGRAFIA.....	64

RESUMO

A grande carência de material experimental adequado para o ensino de Ótica no Brasil motivou o desenvolvimento de um processo de moldagem de lentes acrílicas, pelo Centro de Divulgação Científica e Cultural. Aproveitando tecnologia já existente na Universidade, o CDCC desenvolveu um processo de moldagem por compressão, relativamente barato, utilizando a placa acrílica comercial como material moldável.

O presente trabalho consiste em caracterizar e avaliar esse processo de moldagem de lentes acrílicas. Para tanto, são levantadas as principais características físicas do material moldável. A qualidade ótica da lente moldada é analisada com base em alguns ensaios, tais como medidas de aberrações geométricas e de birrefringência induzida. Os resultados obtidos permitem a determinação dos parâmetros ideais do processo, e demonstram a possibilidade de obtenção de lentes acrílicas de excelente qualidade ótica para o ensino básico, a um custo acessível.

ABSTRACT

The necessity of experimental optical materials in Brasil for basic learning was the principal motivation for the development of the process to produce acrylic lens in the Centro de Divulgação Científico e Cultural (CDCC). All the process developed use low cost commercial acrylic and a moulding procedure to produce the lens.

In this work we characterize the moulding process and the physical properties for the material. The optical quality for the moulding lens was determine measuring: aberrations and the induce birefringence. These results allow us to determine the optimal parameters for the process, and the possibility to production of high quality lens for the basic schools.

I - INTRODUÇÃO

Equipamento de ensino para Ciência não é equipamento de pesquisa simplificado para fins didáticos, nem aproveitamento de material de sucata. O material utilizado em salas de aula e laboratórios didáticos exige tecnologia e desenvolvimentos próprios. Várias considerações, como público alvo, precisão técnica e controle de qualidade, são importantes na produção de material didático. Em países onde existe um grande mercado de material educacional há um grande número de empresas especializadas no desenvolvimento e comercialização de equipamento didático. No Brasil, a dificuldade de manter simultaneamente boa qualidade técnica e preços baixos no mercado de material educacional experimental, geralmente torna o negócio economicamente inviável para as empresas. No caso de material destinado às aulas experimentais de Ótica, a maior parte disponível no mercado é importada. Normalmente, lentes de boa qualidade ótica são de vidro, e são caras. Já as lentes plásticas, com qualidade ótica inferior, podem ser encontradas a um preço um pouco mais baixo; ainda assim, elas são caras para o ensino básico no Brasil. Uma maneira de solucionar esses problemas seria aproveitar a tecnologia de ponta já existente na Universidade para desenvolver modelos de alta qualidade e de baixo custo. Esse tem sido o objetivo do Centro de Divulgação Científica e Cultural da USP (São Carlos), que vem se dedicando desde 1984 à criação de equipamento didático para o ensino de Ciência e Tecnologia para o primeiro e segundo grau, e que, desde 1993, também vem desenvolvendo lentes acrílicas.

Embora há muito se conheçam as propriedades do Polimetacrilato de metila (Acrílico) e

suas aplicações óticas, a indústria insiste em utilizar o Poliestireno em material didático devido ao baixo custo de produção, uma vez que este material pode ser facilmente injetado, apesar de sua qualidade inferior em relação ao Acrílico, que para ser utilizado em injetoras exige a adição de plastificantes e estabilizadores devido a sua baixa viscosidade, mesmo quando submetido a altas temperaturas. O Acrílico pode ser considerado ainda um polímero ecológico, uma vez que possui a propriedade de ser totalmente convertido a monômero em uma reação de despolimerização, quando submetido a condições de temperatura e pressão adequadas.

A proposta do CDCC é produzir lentes acrílicas a partir de material comercial de boa qualidade ótica, para uso no ensino, principalmente no nível secundário.

O presente trabalho tem como objetivo principal a caracterização e avaliação do processo de moldagem de lentes desenvolvido pelo CDCC.

O trabalho encontra-se assim dividido:

No capítulo II discutiremos as propriedades físicas dos principais plásticos óticos, sem nos preocuparmos com as bases físicas relacionadas a essas propriedades

No capítulo III faz-se uma descrição das principais propriedades químicas dos polímeros de seus processos de moldagem.

No capítulo IV é descrito o processo de moldagem desenvolvido pelo CDCC para a confecção das lentes acrílicas, cujas propriedades óticas e qualidades serão analisadas nos capítulos V e VI.

No capítulo VII estão relacionadas as principais conclusões obtidas no trabalho, bem como a apresentação de novas propostas.

II - PROPRIEDADES FÍSICAS DOS PLÁSTICOS ÓTICOS

Elementos óticos de vidro polido com piche continuam sendo os de melhores qualidades óticas. A excelente homogeneidade e a alta transmitância interna de alguns vidros são insuperáveis pelas de qualquer outro material ótico (pelo menos até o momento). A variedade de vidros óticos é muito maior do que a de plásticos. Isso significa uma maior variedade também para a escolha de índices de refração e dispersão. Há, entretanto, muitas razões para os fabricantes de produtos óticos substituírem o vidro pelo plástico. As principais são: o baixo custo do material e a rapidez do processo de moldagem; isso é de extrema importância para a indústria, pois significa economia. Além do baixo custo e da confecção rápida e fácil, algumas das outras vantagens do plástico em relação ao vidro são: a configuração flexível que o elemento ótico pode assumir durante a moldagem, a alta resistência ao impacto e a baixa densidade (são mais leves do que o vidro).

O uso de plásticos óticos não é novo. Para se ter uma idéia, na década de 30, o acrílico já era polimerizado com sucesso, e no ano de 1934, o inventor Arthur Kingston, diante da possibilidade de obter um produto barato e que não se quebrasse com facilidade, desenvolveu a primeira lente plástica injetável. Por muitos anos, o plástico foi utilizado na confecção de elementos óticos que não exigiam precisão, tais como lâmpadas de sinalização, óculos de sol, “mostradores”, brinquedos, entre outros. Mais recentemente, com avanço tecnológico,

plásticos opticamente refinados, combinados com técnicas de fabricação, resultaram em lentes, prismas e espelhos que competem com os melhores vidros óticos. A transparência de alguns plásticos é superior a muitos vidros óticos de alta qualidade; além disso, eles transmitem os raios ultravioletas do sol, enquanto que os vidros comuns os absorvem. O uso criativo do plástico, quanto ao formato do elemento ótico, compensa a pouca variedade de material existente.

O plástico, porém, possui desvantagens em relação ao vidro. Uma delas é que ele risca mais fácil do que o vidro. Outra importante desvantagem do plástico é sua intolerância a grandes variações de temperatura. O melhor deles, nesse aspecto, não pode ser utilizado a uma temperatura superior a 116 °C, sem que se degrade. Também não há muita opção na escolha do índice de refração para um plástico ótico comercialmente disponível, que vai de 1,45 até aproximadamente 1,60.

II.1 - PRINCIPAIS PLÁSTICOS ÓTICOS

II.1.1 - Acrílico

O Acrílico é o plástico mais utilizado na confecção de elementos óticos de precisão. Ele é o mais estável (tanto ótica quanto mecanicamente) para moldagem, e também o mais fácil para ser cortado e polido. Sua transparência de 92% (ALMAND, 1972) é superior às dos outros plásticos e, ainda, a de muitos vidros óticos. A absorção de luz no interior de uma placa de Acrílico é menor do que 0,5% (U.S. PRECISIN LENS, 1983), por polegada; além disso, são raras e pequenas (da ordem de 0,05 mm, no máximo) as bolhas e partículas estranhas que contribuem para o espalhamento interno de luz (Haze), ou seja, a maior parte da luz que

atravessa o Acrílico caminha em linha reta. Seu índice de refração é $n_d = 1,492$ (WOLPERT, 1983 a). O Acrílico é considerado o *crown* dos plásticos, sendo pouco dispersivo na região visível do espectro.

II.1.2 - Poliestireno

O baixo custo do material, associado à facilidade de moldagem, faz do Poliestireno um grande atrativo para a produção industrial em larga escala, tais como lentes para brinquedos. Sua transparência está em torno de 89%, um pouco menor do que a do Acrílico. Inicialmente o Poliestireno possui impurezas que diminuem a transmissão de luz na região azul do espectro, o que lhe dá uma tendência para ter uma cor amarelada. Entretanto isso só é perceptível para grandes espessuras da amostra. Aparentemente, uma lente de Poliestireno possui transparência tão boa quanto uma outra de Acrílico; porém, o Poliestireno é instável na presença de luz, o que o torna amarelado com o passar do tempo. Além disso, ele risca mais facilmente do que o acrílico. Com um índice de refração $n_d = 1,590$ (WOLPERT, 1983 a) e um baixo valor de Abbe, o Poliestireno possui um alto poder dispersivo, sendo o *flint* dos plásticos. Quando associado a um elemento ótico de acrílico, ele forma um sistema corretor acromático, corrigindo o espectro secundário melhor do que o conjunto de vidro acromático.

II.1.3 - NAS

O Poliestireno pode ser combinado com o Acrílico de diferentes formas, resultando num índice de refração que pode variar de 1,53 a 1,57, dependendo do copolímero. O NAS, feito de 70% de Poliestireno e 30% de Acrílico, é um pouco mais barato do que o Acrílico e mais resistente à abrasão do que o Poliestireno, e seu índice de refração é $n_d = 1,564$ (U.S

PRECISION LENS, 1983). Esse material tem sido uma outra opção para os fabricantes de elementos óticos. Sua transparência é de 90%.

II.1.4 - Policarbonato

O Policarbonato possui alta resistência ao impacto. Sua principal aplicação tem sido a construção de elementos óticos que não exigem precisão, tais como janelas de proteção industrial, janelas “à prova de bala”, lentes para iluminação de rua, faróis de sinalização, lanternas de automóveis e outras aplicações desse gênero. Seu índice de refração é $n_d=1,586$. Uma vantagem do Policarbonato em relação aos outros plásticos é que ele pode ser utilizado numa larga faixa de temperatura, de -137°C até aproximadamente 116°C , sem degradar-se. Além disso, sua resistência ao ataque de produtos químicos é superior à do Acrílico e do Poliestireno. Para aplicações ao ar livre, entretanto, é necessário a utilização de um aditivo estabilizador ultravioleta no composto (para evitar a degradação ótica), ocasionando uma perda de aproximadamente 5% na transparência total, que é em média 88% (U.S PRECISION LENS, 1983). O Policarbonato risca mais facilmente do que o Acrílico e o Poliestireno, e seu custo é relativamente mais alto.

II.1.5 - CR-39 (Carbonato Diglicol de Alila)

O Carbonato Diglicol de Alila, mais conhecido pelo seu nome comercial, CR-39, é o único termorrígido importante para aplicação em sistemas óticos (no capítulo seguinte discutimos o significado das palavras *termoplástico* e *termorrígido*). Ele tem excelente claridade ótica, transparência de aproximadamente 92%, com um índice de refração $n_d = 1,504$ (ALMAND, 1972). Possui boa resistência ao impacto e ao ataque químico, e sua resistência à abrasão é

superior à do Acrílico. Sua principal aplicação está na confecção de lentes oftálmicas. Entretanto, a alta contração que o material sofre durante a moldagem (aproximadamente 14%), limita seu uso em outras áreas. O material é bastante caro e o processo de moldagem, difícil e também muito caro.

Existem ainda muitos outros plásticos transparentes, mas sem muita importância para aplicações em sistemas óticos. Um exemplo é o *TPX*, que apresenta excelentes propriedades elétricas, mas que contrai de 15% a 30% durante a moldagem.

II.2 - PROPRIEDADES FÍSICAS

II.2.1 - Transmitância

A transmitância de um material depende basicamente de dois fatores: a reflexão e a absorção. De 8% da perda na transmissão de luz através de uma placa de Acrílico com 1/8 de polegada (U.S PRECISION LENS, 1983), mais de 7,5% deve-se à reflexão (isso ocorre devido a diferença entre os índices de refração entre o ar e o vidro). Em sistemas de múltiplas lentes, a perda de transmissão por reflexão pode ser um problema. Para minimizar essas perdas deve-se aplicar sobre a lente uma substância anti-refletora, assim como é feito em lentes de vidro. Dessa forma pode-se conseguir uma transparência superior a 99% para o Acrílico. Infelizmente, o custo dessa substância é muito maior do que o do próprio acrílico.

Todos os plásticos óticos degradam um pouco, tanto mecânica quanto opticamente, quando expostos a radiação ultravioleta. O acrílico possui a maior resistência ao UV; testes revelaram que após a exposição ao “ar livre” por 10 anos, a perda na transmissão de luz é de apenas 1%. A maioria dos plásticos disponíveis no mercado contém aditivos para absorver a radiação UV.

Figura II.1: Espectro de Transmissão para alguns plásticos óticos (U.S PRECISION LENS, 1983).

Por isso, alguns perdem parte da transparência, e outros podem até ficar opacos. Todos os plásticos óticos transmitem bem na região visível do espectro. A figura II.1 mostra a transmitância para os 4 principais plásticos óticos. Cada plástico absorve mais numa determinada região do espectro. Isso pode ser corrigido ou controlado pelos fabricantes de plásticos óticos, colocando pigmentos (que servem como um filtro) no composto. A figura II.2 mostra a transmitância para um vidro tipo Crown.

II.2.2 - Índice de Refração

Os plásticos óticos comercialmente disponíveis, normalmente, possuem um índice de refração que varia aproximadamente de 1,45 a 1,60, dependendo do plástico. Alguns, com índices fora dessa faixa, têm sido desenvolvidos em laboratórios, mas não estão disponíveis comercialmente. A homogeneidade ótica do plástico pode ser definida como a uniformidade do índice de refração, dentro do material. Fabricantes de plásticos óticos podem manter esta uniformidade com um erro de 5×10^{-4} , o que é uma tolerância muito boa se comparada à do vidro ótico. Os vidros óticos da Schott, por exemplo, tem uma homogeneidade que garante não exceder $\pm 1 \times 10^{-4}$. Alguns vidros especiais podem ter n_d com máximo erro de 1×10^{-6} . Testes feitos com o Acrílico revelam índices com erro de $1,7 \times 10^{-4}$ (WOLPERT, 1983 a).

Por possuírem um índice de refração menor do que o do vidro, elementos óticos plásticos necessitam ter formas com curvas mais inclinadas e componentes mais grossos do que os de vidro, o que piora a performance ótica, por causa das aberrações.

Os vidros óticos se dividem em *flint* e *crown*, conforme forem muito ou pouco dispersivos (em relação ao comprimento de onda), respectivamente.

Figura II.2: Espectro de Transmissão para vidros óticos especiais (CATÁLOGO DE INSTRUMENTOS ÓTICOS DA MELLES GRIOT. s.l., 1996).

Tradicionalmente essa caracterização é feita de acordo com n^o de Abbe do material:

$$v_d = (n_d - 1) / (n_f - n_c) \quad (\text{II.1})$$

em que os índices d , f e c correspondem respectivamente às linhas espectrais de comprimento de onda $\lambda_d = 589,3$ nm (amarelo), $\lambda_f = 486,1$ nm (azul) e $\lambda_c = 656,3$ nm (vermelho). *Grosso modo*, vidros com v_d menor do que 50 são *flint*; se for maior do que 50, são *crown*.

Os plásticos assim como a maioria dos materiais óticos, obedecem a tendência de que quanto maior o índice de refração do material, menor é o seu número de Abbe. Para os plásticos, nos quais há uma predominância de estrutura molecular amorfa, há também outra tendência interessante, de que quanto maior a densidade do material, maior é o índice de refração.

A taxa de variação do índice de refração com relação a temperatura, para o plástico, oscila entre 6 e 50 vezes a taxa do vidro, dependendo dos materiais a serem comparados. Para o acrílico, ele é $-8,5 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ (entre 20 e 40 $^{\circ}\text{C}$), e para o vidro BK7, $+0,3 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ (WOLPERT, 1983 b).

Assim como para o vidro, peças de plástico retêm tensões residuais mesmo após tratamento térmico para amolecimento. O trabalho de corte e polimento da peça pode aumentar ainda mais as tensões. O Acrílico é o material que apresenta menos problemas, nesse aspecto. Essas tensões causam uma dependência do índice de refração em relação a direção, dentro do material. Quando um plástico é moldado por injeção e resfriado rapidamente, ocorre o desenvolvimento de fortes tensões. Normalmente, isso determina a obtenção de um plástico, com máxima diferença no índice de refração para duas direções perpendiculares, uma na direção do fluxo do material e outra perpendicular a ele; a isso denomina-se *Birrefringência*. Para o acrílico, essa diferença no índice de refração será $0,06 \times 10^{-3}$, enquanto que para o

Poliestireno, será 8×10^{-3} (WOLPERT, 1983 b).

Tratamentos térmicos especiais possibilitam a obtenção de plásticos e vidros com muito pouca tensão residual. Para aplicações muito críticas, em que o sistema ótico exige alta precisão, a birrefringência deve ser analisada, mas para a maioria das aplicações óticas, ela pode ser ignorada.

II.2.3 - Densidade

Uma das vantagens do plástico em relação ao vidro é que, para um mesmo volume, o plástico pesa, em média, menos do que a metade do peso do vidro. Para sistemas óticos com lentes pequenas, isso não tem importância. Mas, quando grandes elementos são usados, isso pode ser decisivo. A densidade do vidro crown oscila entre 2,5 e 3,5 g/cm³, enquanto que a do flint está entre 3,0 e 5,0 g/cm³. Já para o plástico ótico, a densidade varia de 0,83 a 1,46 g/cm³ (U.S PRECISION LENS, 1983).

II.2.4 - Impacto; Abrasão; Ataque Químico; Anti-estático

A alta resistência ao impacto é uma das mais importantes características dos plásticos óticos. Alguns são quase “inquebráveis”. O Policarbonato é o que tem a mais alta resistência ao impacto. Para se ter uma idéia, uma das suas aplicações atuais é a confecção de janelas à prova de bala. Por outro lado, um dos principais problemas apresentados pelos plásticos óticos é que eles riscam muito facilmente. O Acrílico é o que possui melhor resistência à abrasão dentre todos os outros termoplásticos (embora seja muito inferior a do vidro), seguido pelo NAS, SAN, Poliestireno e então, o Policarbonato. Em geral, os mesmos revestimentos com resistência à abrasão aplicados nos elementos de vidro também podem ser aplicados nos

plásticos. Esses revestimentos também podem ser anti-reflectores ou anti-estáticos. O processo de deposição do revestimento na superfície do vidro é feito a temperaturas de 200 a 300°C, a vácuo. Para o plástico, o processo de deposição tem de ser feito a temperaturas mais baixas, por motivos de volatilização de solventes, plastificantes, etc. Assim, a adesão do revestimento no plástico não é tão boa quanto no vidro; a exceção é o Policarbonato que possui uma alta temperatura de cura. Contudo, o custo do revestimento não justifica sua utilização em plásticos óticos de baixo custo, exceto em aplicações oftalmológicas. Para esse fim, entretanto, geralmente utiliza-se o termorrígido CR-39, cuja a resistência à abrasão é de 30 a 40 vezes (HORNE, 1978) a do Acrílico, e aproxima-se a do vidro; por isso, dispensa a aplicação de revestimentos. Além disso, possui boa resistência ao impacto e ao ataque químico.

Plásticos geralmente são susceptíveis ao ataque químico. O Policarbonato e o Nylon, entretanto, constituem uma exceção; eles são resistentes a maioria dos ataques químicos.

Como todos os materiais dielétricos, os plásticos também possuem alta resistividade superficial, e por isso, não apenas adquirem cargas eletrostática, como podem retê-las por tempo indeterminado. Espécies líquidas de detergente (diluído em água para não atacar o material) podem proteger temporariamente a superfície do elemento ótico contra cargas elétricas, mas para se obter um efeito duradouro, deve-se utilizar anti-estáticos comerciais. Revestimentos anti-estáticos também são disponíveis para deposição a vácuo. Alguns, têm sido aperfeiçoados para combinar propriedades anti-reflectoras com as anti-estáticas.

II.2.5 - Temperaturas Características e Expansão Térmica

A maioria dos plásticos óticos moldados podem ser utilizados continuamente a uma temperatura média situada entre 2 e 75°C. O Policarbonato constitui uma exceção, já

comentada anteriormente. Sua utilização pode ser feita entre -137 e 116°C. Outra exceção é o CR-39, que possui uma temperatura de trabalho contínuo igual a 100°C e pode permanecer por pouco tempo a uma temperatura igual a 150°C sem se degradar.

Já que a condutividade térmica dos plásticos é baixa, o que reduz a dissipação de calor, é necessária a utilização de um lubrificante adequado para o caso de corte e polimento do plástico.

A expansão térmica do plástico é maior do que a do vidro. O coeficiente linear de expansão para o Acrílico é $7 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$, enquanto que para o vidro crown, ele é aproximadamente $0,7 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ (WOLPERT, 1983 a). Por exemplo, para uma variação de temperatura de 27 a 65°C, uma lente com 25 mm de diâmetro terá uma variação de 0,0762 mm (0,3%); uma distância focal de 50 mm terá um aumento igual a apenas 0,2 mm (0,4%). Testes feitos com vários plásticos, revelaram que uma variação na temperatura igual a 100°C ocasiona uma mudança média na distância focal da lente igual a apenas 1%, o que, geralmente, é tolerável.

Tabela II.1 - Propriedades Físicas dos Principais Plásticos Óticos (U.S PRECISION LENS, 1983).

Propriedades		Acrílico	Poliestireno	Policarbonato	NAS
Índice de Refração	n_d	1,4917	1,5903	1,5860	1,5640
	n_F	1,4978	1,6041	1,5934	1,5744
	n_c	1,4892	1,5849	1,5760	1,5583
Valor de Abbe		57,2	30,8	34,0	35
dn/dt ($\times 10^{-5}/^{\circ}C$)		-8,5	-12	-14,3	-14
Haze (%)		< 2	< 3	< 3	< 3
Transmissão (%)		92	87 - 92	85 - 91	90
Temperatura de Serviço Contínuo Máximo ($^{\circ}C$)		75	75	116	75
Densidade		1,19	1,06	1,20	1,09

III - PLÁSTICOS

III.1 - INTRODUÇÃO

Quando as moléculas se tornam muito grandes, contendo um número de átomos encadeados superior a uma centena e podendo atingir um valor infinito, elas passam a se chamar *macromoléculas*. As propriedades associadas às essas moléculas tornam-se evidentes. Pontes de Hidrogênio, interações dipólo-dipólo e forças de Van der Waals, atuando nessas moléculas no estado sólido, criam resistência muito maior do que no caso de moléculas de cadeia curta. Em solução, essas interações entre moléculas de alto peso molecular resultam em um grande aumento da viscosidade.

Polissacarídeos, proteínas e ácidos nucleicos são exemplos de macromoléculas naturais orgânicas, que constituem o amido, algodão, madeira, lã, cabelo, couro, seda natural, chifre, unha, borracha de seringueira, etc.

Há muita semelhança entre os conceitos de macromoléculas e polímeros. *Polímeros* são moléculas relativamente grandes, de pesos moleculares acima de 10^3 (em Dalton) e cuja estrutura é formada por repetidas unidades químicas simples denominadas *meros*. O termo “polímero” vem do grego e significa muitas partes (meros). Literalmente, qualquer moléculas com alguns meros poderia ser chamada de polímero. Porém essa expressão só é usada quando a cadeia molecular atinge uma proporção tal que as propriedades relacionadas à ela tornam-se evidentes. Assim, compostos com elevado peso molecular, em que a complexidade das moléculas (e não a repetição de simples unidades) determina o seu

tamanho, são englobados no termo geral “macromoléculas”, que inclui também os polímeros.

Os compostos químicos que reagem para formar o polímero são chamados *monômeros*. E a reação química que leva à formação do polímero é a *polimerização*. O encadeamento das unidades monoméricas pode ser feito na forma regular, “cabeça-cauda”, ou na forma “cabeça-cabeça”, “cauda-cauda”, ou mista. Em polímeros geralmente ocorre o primeiro caso. Em seguida ilustramos um trecho da molécula de acrílico através de sua fórmula molecular (figura III.1).

Monômero de Metacrilato de Metila

Polímero de Metacrilato de Metila

Figura III.1 - Fórmulas do Metacrilato de Metila e do seu polímero (Acrílico).

Quando a polimerização é feita com mais de um tipo de monômero, então haverá mais de um tipo de mero no polímero, que passa a se chamar *copolímero*. Quando o polímero tem apenas um tipo de mero, usa-se a expressão *homopolímero* em contraposição a copolímero.

A mistura física de dois ou mais polímeros, sem qualquer reação química, visando

alterar as suas propriedades para satisfazer as necessidades do comércio, ou otimizar a relação custo/eficiência, denomina-se *blenda polimérica*, ou simplesmente *blenda*. Enquanto polímeros e copolímeros são substâncias homogêneas, blendas são heterogêneas.

III.2 - CLASSIFICAÇÃO DOS POLÍMEROS

Os polímeros podem ser classificados, basicamente, quanto a estrutura química, o método de preparação, as características tecnológicas e o comportamento mecânico.

Quanto a estrutura química, o polímero pode ser *linear*, *ramificado*, ou *reticulado* (com ligações cruzadas). A figura a seguir ilustra os três casos.

Os ramos laterais das cadeias ramificadas interferem no ordenamento das

Figura III.2 - Estrutura Química de Polímeros

moléculas de modo que a cristalinidade¹ diminui. Eles também dificultam a aproximação entre as cadeias, diminuindo assim a interação molecular, o que pode acarretar perda nas

¹ Muitos polímeros têm algum grau de cristalinidade, geralmente medido em porcentagem. A cristalinidade pode ser caracterizada como um arranjo ordenado ou uma repetição regular de estruturas moleculares, no espaço.

propriedades mecânicas. As ramificações funcionam como *plastificantes internos* do polímero, o que é intrínseco do material, em contraposição a igual efeito obtido pela adição de *plastificantes externos*, que são removíveis por meios físicos. Para os polímeros com cadeias reticuladas, as ligações cruzadas entre as moléculas “amarram” as cadeias, impedindo o seu deslizamento umas sobre as outras, aumentando a resistência mecânica e tornando o polímero insolúvel e não fusível.

Quanto ao método de preparação, os polímeros são divididos, de uma forma geral, em *poliadição* e *policondensação*. Na polimerização por adição não há subprodutos (Ex.: polimerização de Acrílico e Poliestireno), enquanto que na polimerização por condensação, sim, o crescimento da cadeia depende da eliminação de pequenas moléculas, como H_2O , HCl e NH_3 . O armazenamento de monômeros, normalmente, utiliza substâncias inibidoras e retardadoras de polimerização espontânea, para a estabilização do monômero. Industrialmente, é preciso conhecer tanto quanto possível seus efeitos na polimerização. O resultado pode ser a redução da velocidade do processo total, e também do comprimento médio das cadeias, o que implica em um *peso molecular médio* mais baixo. Em geral, quanto menor o peso molecular, menor serão também a viscosidade, o ponto de amolecimento (ainda que seja uma variação muito pequena (RODRIGUEZ, 1974), a resistência à tração, ao impacto, etc.

Na indústria de polímeros, o comportamento a alta temperatura constitui a base de classificação dos polímeros em *termoplásticos* e *termorrígidos* (ou *termofixos*). *Termoplásticos* são aqueles materiais que amolecem e fluem pela aplicação de calor. A maioria dos materiais termoplásticos pode ser moldada várias vezes, apesar de que a degradação química limitará esse número de vezes. Portanto, para os termoplásticos, haverá uma temperatura limite, acima da qual o elemento moldado não poderá ser

utilizado. *Termorrígidos* são os materiais que, uma vez aquecidos, reagem irreversivelmente; ou seja, uma vez formados, não amolecem mais por aplicação de calor. Se a temperatura for suficiente alta, o material se decompõe, sem entretanto amolecer.

Quanto ao comportamento mecânico os polímeros são divididos em três grandes grupos: *borrachas*, *plásticos* e *fibras*. *Borracha* é um polímero que, à temperatura ambiente, apresenta grande elasticidade. O termo “plástico” vem do grego e significa “suscetível de ser moldado” (ENCICLOPÉDIA MIRADOR, 1992). No meio técnico, plásticos são materiais sintéticos que, embora sejam sólidos à temperatura ambiente, em algum estágio do seu processamento, tornam-se fluídos e possíveis de serem moldados, por ação de calor ou pressão. *Fibra* é um corpo que tem uma elevada razão (pelo menos 100 vezes) entre o seu comprimento e as suas dimensões laterais. O termo *resina* se refere à massa polimérica em seu estado de “pré-polimerização”. A resina, que possui peso molecular intermediário ou alto, é sólida ou líquida muito viscosa à temperatura ambiente, e amolece gradualmente por aquecimento.

III.3 - ESTRUTURAS QUÍMICAS E ESTADOS FÍSICOS DOS POLÍMEROS.

Já dissemos que os materiais termoplásticos amolecem quando aquecidos (sem reagirem quimicamente) e endurecem quando resfriados, enquanto os termorrígidos, uma vez formados, não amolecem por aquecimento abaixo de sua temperatura de decomposição. Podemos identificar os polímeros termoplásticos como aqueles com estrutura linear ou ramificada. Os termorrígidos geralmente formam estrutura reticulada (o que corresponde a um peso molecular “infinito”), quando aquecidos pela primeira vez. Entretanto, em todas as generalizações feitas no campo de polímeros há muitas exceções. A celulose, por exemplo, é um polímero essencialmente linear (assim como o algodão). Entretanto, devido a estrutura com ligações de Hidrogênio forte, não se observa nenhum

amolecimento a temperaturas inferiores à de sua decomposição.

Quanto aos estados físicos, os polímeros podem assumir, de um modo geral, três condições extremas:

- 1. Estado Fundido:** No estado fundido, as moléculas do polímero ficam em movimento contínuo, deslizando umas sobre as outras. Quanto maior a temperatura, maior a intensidade do movimento molecular. Para uma determinada temperatura, quanto maior o peso molecular do polímero, menor será a intensidade de movimento molecular (maior a viscosidade do material).
- 2. Estado Vítreo:** A uma temperatura suficientemente baixa, o movimento de uma cadeia em relação à outra cessa, devido as barreiras energéticas de atração intermolecular. As moléculas dos polímeros ficam presas em um estado desordenado.
- 3. Estado Cristalizado:** As moléculas de um polímero podem estar dispostas de tal maneira que a atração intermolecular estabiliza as cadeias em uma estrutura regular, mesmo quando as barreiras intermoleculares de energia não são altas. Se a temperatura diminui, de tal maneira que essas barreiras de energia aumentam muito, o cristal se torna ainda mais estável.

Quando a massa viscosa e quente de um polímero fundido é deixada esfriar sem interferências de forças externas, em geral, há primeiro a formação de “cristalitos”², em maior ou menor grau, dependendo da estrutura do polímero. Invertendo o processo, ao elevar-se progressivamente a temperatura da massa polimérica, passa-se primeiro por uma transição de segunda ordem, chamada *transição vítrea*, à temperatura T_g (temperatura de

² Cristalitos são regiões ou volumes de matéria em que a estrutura molecular é ordenada com arranjo regular geométrico.

transição vítrea), a partir da qual as regiões amorfas readquirem progressivamente a sua mobilidade. (Normalmente, os valores tabelados de T_g correspondem à temperatura de endurecimento do polímero). Prosseguindo com o aquecimento, passa-se por uma transição de primeira ordem chamada *fusão cristalina*, à temperatura T_m (temperatura de fusão cristalina). Acima dessa temperatura, o polímero estará no estado “líquido” viscoso.

Alguns polímeros, como por exemplo o poli(Metacrilato de Metila) (ou Acrílico), não formam cristais e, ao se esfriarem a uma temperatura abaixo de T_g , mudam diretamente do estado fundido para o vítreo, de estrutura rígida e amorfa.

O processo familiar de “passar roupa”, geralmente ocorre entre T_g e T_m , de maneira que pode-se tirar as rugas da roupa sem destruir a sua estrutura total devido à cristalinidade. Quando se “passa” com vapor, a umidade “plastifica” o material, diminuindo o valor de T_g , o que permite “passar a roupa” a uma temperatura mais baixa.

III.4 - TÉCNICAS DE POLIMERIZAÇÃO

Existem basicamente 4 processos de polimerização industrial: *em massa*; *em solução*; *em emulsão* e *em suspensão*.

Na *polimerização em massa*, são utilizados apenas o monômero e o iniciador de polimerização. Em geral, a reação é fortemente exotérmica e a baixa condutividade térmica impede a eliminação do calor. A alta viscosidade dificulta a difusão do monômero, e por isso, também é difícil a conversão de todo o monômero. A técnica permite a obtenção de peças moldadas diretamente a partir do monômero, sem pressão, com excelentes qualidades óticas. Tem grande aplicação na fabricação industrial de placas acrílicas. Nesse caso, o monômero (Metacrilato de Metila) é misturado a um catalisador, dentro de um “misturador”, até o ponto em que se obtém um líquido viscoso que, em seguida, é derramado no molde, que consiste de duas placas paralelas de vidro polido, separadas por

material flexível, que permite a acomodação do polímero durante a contração de aproximadamente 21% (HORNE, 1978). O tempo e a temperatura da polimerização dependem das dimensões da placa.

Na *polimerização em solução*, além do iniciador, usa-se um solvente dos monômeros, podendo ou não ser solvente do polímero formado. As vantagens são as seguintes: facilidade de transferência de calor e, portanto, homogeneidade de temperatura; pode-se obter o polímero em solução, para utilizá-lo em revestimento, etc.. As desvantagens são: retardamento da reação pelo solvente e dificuldade de sua remoção do polímero, o que pode causar bolhas e rachaduras. É a técnica mais utilizada em policondensações.

Na *polimerização em emulsão*, os monômeros são emulsionados em um não-solvente, geralmente água, contendo um catalisador e um emulsificante, geralmente um sabão. É um processo amplamente utilizado nas poliadições. Além do iniciador e do emulsificante, outros ingredientes podem ser adicionados, conforme o caso. Apresenta a vantagem de fácil controle de temperatura, de rápida e alta conversão. A desvantagem é a dificuldade de completa remoção do emulsificante, o que restringe as aplicações do material.

Se o monômero é insolúvel em água, pode-se efetuar a *polimerização em suspensão*. Nessa técnica, a viscosidade altera-se muito pouco com a conversão do monômero, de modo que a transferência de calor para as paredes do reator pode ser eficiente. O comportamento dentro das “gotículas” é muito semelhante ao de polimerização em massa, mas devido ao fato de que as “gotículas” tem apenas de 10 a 1000 μm de diâmetro, a velocidade de reação pode ser maior sem que o monômero ferva. Para evitar a coalescência das “gotículas” viscosas, utiliza-se um agente de suspensão, assim como uma cuidadosa agitação. A precipitação do polímero, ao término do processo, é feita simplesmente pela interrupção da agitação, depositando-o em forma de “pérolas”. A recuperação final das “pérolas”, que são de 100 a 1000 μm de diâmetro, é feita por filtração e lavagem. Essa

técnica pode ser utilizada para a preparação do Poli(Metacrilato de Metila) em “pó” (RODRIGUEZ, 1984), que por sua vez, pode ser utilizado em quase todos os processos de moldagem: injeção, extrusão, prensagem, etc.

Tabela III.1 - *Propriedades Químicas dos Principais Plásticos Óticos (MANO, 1985).*

Tipo de Material	T_m (°C)	T_g (°C)	PM (Dalton)
Poli(Metacrilato de Metila) ou Acrílico (amorfo)	—	105	500.000 a 1.000.000
Poliestireno	240	100;105	300.000
Polycarbonato	268	150	30.000

III.5 - PREPARAÇÃO DO MATERIAL

A ligação entre o produtor de polímeros e o usuário final pode seguir diferentes caminhos, podendo passar por vários processos, dependendo da aplicação à que se destina o produto. Por exemplo: uma determinada companhia pode produzir um polímero, uma outra pode prepará-lo com aditivos, corantes, etc., para ser moldado, posteriormente, por uma terceira companhia. A forma de apresentação de um polímero está vinculada ao processo que será empregado para transformá-lo em uma peça ou um determinado produto. A forma primária de apresentação dos termoplásticos é a granular. A *resina termoplástica* é obtida por polimerização e apresentada pronta, em seu estado final, eventualmente já com pigmentos e com propriedades melhoradas pelo uso de aditivos, com os mais variados objetivos (retardantes de chama, protetor contra degradação por raios ultravioletas, etc.). O material é então reduzido a pequenos grãos (pellets) com dimensões de 2 a 3 milímetros. Esses grãos tem de ser de tamanho uniforme, lisos e sem rebarbas, para facilitar seu deslizamento pelo funil e pela rosca da máquina injetora. O material também pode ser apresentado já semi transformado, ou seja, “extrudado” em forma de barras, placas ou chapas finas. Usualmente, as barras e as placas se destinam a obtenção de peças por processos convencionais de

usinagem. Já as chapas finas e laminados podem, uma vez aquecidos, serem conformados por ação mecânica, ao serem prensadas em um molde com geometria adequada para dar à peça a forma desejada. Normalmente, o termoplástico é adquirido por quem irá transformá-lo em objetos ou peças, já “peletizado” e pronto para ser injetado. O fornecedor, ao preparar o material, “extrudá-lo” e “peletizá-lo”, acrescenta ao mesmo, aditivos, cargas e pigmentos para conferir-lhe qualidades que o torne atraente para o transformador, por apresentar melhores qualidades físico-químicas, maiores facilidades de processamento ou outras características especiais. Muitas vezes, o próprio transformador solicita materiais com características especiais, não presentes nos materiais usualmente comercializados. Na composição de um determinado material, entretanto, é necessário um grande cuidado para que os aditivos, cargas ou pigmentos utilizados não modifiquem ou anulem efeitos desejados no material, nem reajam entre si ou com o polímero base. Por isso, deve-se obter o termoplástico de fornecedores idôneos, que especifiquem claramente as características e limitações do material fornecido. Os principais ingredientes adicionados à resina sintética para a preparação de uma mistura moldável, são: *lubrificantes, plastificantes, antioxidantes, retardantes de chama, anti-estáticos, cargas e pigmentos*. A resina sintética pode ser homogeneizada com os ingredientes em vários tipos de máquinas misturadoras, para líquidos (com baixa ou alta viscosidade) ou pós. Em poucos casos pode ser dispensada completamente a adição de ingredientes à resina. Um desses casos é a produção de placas acrílicas, feitas pelo processo de *vazamento* (polimerização em massa); embora aí possa ser usado alguns aditivos, como por exemplo um plastificante, eles podem prejudicar a excelente qualidade ótica do material (ENCICLOPÉDIA MIRADOR, 1992). As *resinas termofixas* não podem ser apresentadas em seu estado final, pois isso impediria o seu reprocessamento. Por isso, geralmente elas são apresentadas em forma de mistura de pós (em alguns casos, compactadas em pastilhas) das substâncias que entram em sua composição, as quais irão reagir dentro dos moldes, durante a

fabricação das peças, pela aplicação de pressão e calor, necessários tanto para a moldagem quanto para reação de polimerização.

Algumas vezes, não é possível saber exatamente a procedência do termoplástico, visto que na maioria das vezes ele é revendido por terceiros, e muito menos, a sua composição química ou o processo de fabricação. Nesse caso, um teste de identificação prática do material por combustão (tabela III.2) é bastante simples e pode ser bastante útil.

Tabela III.2 - Identificação prática dos principais termoplásticos transparentes, através da combustão (GUEDES, 1986).

Tipo de Termoplástico	Propagação da chama	Extinção da chama	Características da chama	Comportamento	Odor
Acrílico	Rápida	Não há	Cor amarela no topo e azul nos cantos da base; fumaça preta crépita.	Amolece; pouca carbonização superficial.	O mesmo do monômero (Frutas).
Poliestireno	Rápida	Não há	Cor amarela alaranjada; fumaça densa preta com fuligem.	Amolece, forma bolhas e carboniza na superfície. Após esfriar, a superfície fica cor de pérola.	O mesmo do monômero.
Polycarbonato	Difícil	Há	Cor amarela; fumaça cinza durante a queima.	Amolece, forma bolhas e carboniza.	Característico de medicamentos
SAN	Rápida	Não há	Cor amarela; forte fuligem preta	Funde, borbulha e carboniza na superfície; evidência de poros após esfriar.	O mesmo do monômero estireno.
Nylon	Lenta	Há	Cor azul no topo, base amarela; sem fumaça.	Funde goteja e espuma.	Proteínas queimadas.

III.6 - PROCESSOS DE MOLDAGEM

1. Vazamento (Casting): É o processo mais simples aplicado a polímeros termoplásticos e termorrígidos. Consiste em verter, ou seja, vaziar no molde a solução viscosa da mistura de um polímero com o seu monômero (Ex.: placas acrílicas), ou de monômeros com reagentes, que resultarão o polímero. O processo é aplicado na confecção de lentes oftalmológicas cujo material utilizado é o termorrígido CR-39.

2. Extrusão: Processo utilizado na fabricação de tubos (Ex.: tubos de PVC), laminados e bastões, granulações de materiais termoplásticos, revestimentos isolantes para cabos elétricos, etc.. Utiliza-se também para plastificação, estabilização e coloração de termoplásticos, para mistura física de polímeros (blendas) e também mistura de materiais reagentes. O material é aquecido e forçado a passar numa matriz com um determinado perfil, solidificando-se a peça progressivamente por resfriamento. No caso de granulação, o material extrusado tem o perfil de um arame, que é cortado na saída da máquina.

3. Calandragem: É utilizado na produção em larga escala de lâminas e lençóis plásticos contínuos e de espessura regular. Geralmente, o material que alimenta a calandragem está pré-aquecido e pode vir de uma extrusora. A composição polimérica moldável passa entre sucessivos rolos, interligados, que lhe imprimem um brilho na superfície. É utilizado tanto para termoplásticos como para termorrígidos.

4. Injeção: Consiste em introduzir no molde a composição polimérica moldável fundida. O volume de material granulado ou em pó, para carregar o cilindro de injeção, tem de ser dosado. Aquece-se o material (plastificação) que é injetado com pressão no molde. O molde é resfriado e, em seguida, aberto para a expulsão do objeto. O processo é cíclico. É o mais comum dos processos de moldagem e, geralmente, é aplicável aos termoplásticos, embora possa também ser utilizado para os termorrígidos, cuja polimerização se dá no molde. É utilizado, por exemplo, na fabricação de utensílios domésticos.

5. Compressão: O processo consiste em comprimir o material aquecido dentro da cavidade do molde. Quanto ao sistema de acionamento, as prensas podem ser do tipo mecânicas, hidráulicas ou pneumáticas. O processo normalmente aplica-se a materiais termorrígidos (Ex.: solado de borracha), mas também pode ser aplicado aos termoplásticos (Ex.: lentes de Fresnel).

6. Termoformação: Submete-se placas de material termoplástico ao calor, até o amolecimento, aplicando-as sobre moldes contendo orifícios nos quais se aplica vácuo (Ex.: copos de café). Pode-se também sobrepor pressão, conforme a peça.

Outros métodos de moldagem utilizados para polímeros são: *Sopro* (ex.: garrafas plásticas); *Fiação Seca* ou *Úmida* (ex.: fibras); *Imersão* (ex.: luvas de borracha).

III.7 - CONFECÇÃO DE LENTES PLÁSTICAS

Não é possível saber detalhes sobre os métodos de produção de elementos óticos, porque os principais fabricantes usam técnicas patenteadas e tomam medidas importantes para proteger seus segredos.

Com exceção do campo oftalmológico, onde predomina o processo “Casting” do material termorrígido CR-39, mais de 99% dos elementos óticos produzidos são feitos pelo processo de moldagem por injeção. O restante é feito por compressão (ex.: lentes de Fresnel) e por técnicas convencionais para lapidar e polir elementos de grandes dimensões. Industrialmente, a moldagem por injeção apresenta vantagens tão grandes, que outros métodos somente são utilizados quando a moldagem não é possível. A combinação de moldes de múltiplas cavidades com material de baixo custo e ciclos de moldagem de curtos intervalos de tempo possibilita produção em massa de elementos com baixo custo e, conseqüentemente, a obtenção de alta lucratividade.

A moldagem por compressão tem sido aplicada principalmente à produção de lentes

espessas e também de lentes de Fresnel (nas quais os detalhes são muito importantes). Para isso, utiliza-se o material em pó ou em “pellets”, que são colocados no molde aquecido da prensa.

O material utilizado na moldagem de lentes de alta qualidade ótica, geralmente é um copolímero de acrílico com outros materiais (cujos nomes e as porcentagens envolvidas, normalmente permanecem em sigilo) para facilitar a plastificação e principalmente para evitar a contração no molde, durante a polimerização.

Usualmente, o processo “Casting” para fabricação de lentes envolve moldes de vidro e a “cura” do material dá-se sob um cuidadoso controle de temperatura. Por causa da contração que o material sofre durante a polimerização, é necessário projetar o molde de tal maneira que, durante a “cura”, seja possível a aproximação entre as duas partes do mesmo, para acompanhar a contração. É usual também preparar por “Casting” apenas um lado da lente, utilizando lapidação e polimento para o segundo lado.

IV - O PROCESSO DE MOLDAGEM UTILIZADO

IV.1 - A ESCOLHA DO PROCESSO

Na escolha de um processo de moldagem, deve-se considerar aquele que seja mais adequado às características que a peça deve ter no final. O volume de produção desejado também deve ser levado em conta. A utilização de um processo de moldagem por injeção, por exemplo, somente se justificaria para um volume de produção muito grande (da ordem de dezenas de milhares), visto que o custo da máquina, bem como o dos moldes (que são feitos com materiais nobres, e são considerados à parte da máquina), é muito alto. Como a produção típica de material didático é da ordem de alguns poucos milhares, ou menos¹, nesse caso, um processo de lapidação e polimento poderia ser utilizado, apesar de ser um processo muito demorado e pouco prático.

Seria conveniente escolher um processo de moldagem que dispensasse qualquer polimento posterior à moldagem da lente. Várias idéias surgiram, inclusive a de polimerização do material no próprio molde; isso entretanto, foi descartado por causa da alta contração que o material sofre durante a polimerização. Posteriormente, foram feitas algumas tentativas de

¹ UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO/ COORDENADORIA DE DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA E CULTURAL. São Carlos, 1995. *Subprograma para ensino de ciências: produção de um laboratório completo para o ensino de Ótica*. São Carlos, 1995. p. 4 (Proposta de projeto).

moldagem por compressão, utilizando-se uma prensa mecânica simples e material moldável em forma de placa. Observou-se, entretanto, que o ar ficava preso entre o material e o molde (para o caso da lente biconvexa), causando deformações na lente. Além disso, o material muitas vezes se resfriava antes que se conseguisse moldar completamente a lente.

A solução encontrada foi a utilização de uma prensa hidráulica com sistema à vácuo no molde. O processo exige um investimento relativamente baixo e permite um volume de produção apropriado a uma demanda de equipamento instrucional no país. A equipe que trabalhou no projeto entrará com um pedido de patente do processo desenvolvido.

IV.2 O PROJETO DA MÁQUINA

A prensa utilizada no processo de moldagem é uma prensa hidráulica, relativamente pequena, própria para moldar pequenas peças em laboratório. Ela foi projetada pelos próprios técnicos do CDCC e suas peças foram feitas em aço por uma empresa privada. O molde, de aço inox, foi desenvolvido no departamento de Física da USP, utilizando-se tecnologia e mão-de-obra próprias.

O sistema hidráulico foi montado com um motor (de marca WEG) de 3 cavalos de potência, possibilitando uma pressão máxima de 15 toneladas. A pressão pode ser controlada por meio de um manômetro, assumindo valores entre 0 e 15t. O acionamento do sistema é manual, por meio de uma alavanca, fazendo subir ou descer o cilindro da prensa, conforme a alavanca é levantada ou abaixada.

A bomba de vácuo utilizada é da marca IBAV, modelo BRS-2; é suprida por um motor (WEG) de ½ cavalo de potência. Os acionamentos da bomba de vácuo e da prensa

Figura IV.1- Foto: prensa hidráulica e estufa para aquecimento do material.

Figura IV.2 - Projeto da prensa.

são independentes.

Toda a maquinaria (vide fig. IV.1), isto é, a prensa, o molde, o sistema hidráulico, o sistema de vácuo, e a estufa teve um custo (em 1993) de aproximadamente 8.500 dólares (um baixo custo, se comparado ao de uma injetora, que é aproximadamente 90.000 dólares, fora o custo dos moldes).

O molde da lente foi projetado para moldar, numa única peça, uma lente biconvexa (raio de curvatura de 10,0 cm) com um anel protetor em sua borda (ver molde na figura IV.2). O macho e a fêmea do molde possuem as faces altamente polidas. A lateral do molde (indicação 7 da legenda), que numa prensa comum poderia fazer parte da fêmea, é um anel cilíndrico (soldado) que pode ser levantado ou abaixado livremente - o que facilita a retirada da peça do molde - sendo centralizado na prensa por duas hastes (indicação 2). O anel possui um orifício lateral para permitir a evacuação de ar, no momento da moldagem. Ao redor do macho e da fêmea do molde há um sulco onde se encaixa um anel “O’ring”, um retentor de borracha (indicação 19 da legenda) para a vedação de ar e formação de vácuo dentro do molde.

A prensa possui um sistema de refrigeração interna, para refrigerar a peça após a moldagem, por passagem de água (vide figura IV.2).

IV.3 - PROCEDIMENTO

A principal diferença entre os processos usuais de moldagem por compressão e o processo desenvolvido pelo CDCC está na forma do material empregado na moldagem. Os processos usuais utilizam um composto moldável granulado à base de acrílico. Nesse caso, o material é aquecido no próprio molde (plastificação) antes de ser prensado para a moldagem da lente. Em seguida, a peça é resfriada antes de que o molde seja aberto. Esse composto

moldável, entretanto, geralmente vem carregado de aditivos tais como plastificantes, antioxidantes, etc. (que prejudicam a qualidade ótica do material) e, durante a moldagem, o composto libera gases, que devem ser expulsos do molde, antes da prensagem.

O Processo de moldagem desenvolvido pelo CDCC utiliza placa acrílica em lugar de material granulado. Como, entretanto, o acrílico puro, uma vez polimerizado, possui uma alta viscosidade no estado “fundido”, a placa acrílica não pode ser derretida, ela apenas adquire uma maciez semelhante à da borracha². Consequentemente, o processo adquire uma série de particularidades. De maneira geral, ele pode ser dividido em três etapas: o corte da placa, o aquecimento do material e a moldagem por compressão.

IV.3.1 - O Corte da Placa

Por causa do formato circular do molde, obviamente a placa acrílica deve ser cortada em forma de disco. As dimensões desse disco, entretanto, não podem ser quaisquer. O seu diâmetro deve ser menor do que o diâmetro interno do anel do molde (que mede aproximadamente 76 mm), suficientemente para que o disco passe pelo interior do anel. A sua espessura deve ser tal que o volume de material moldável seja suficiente para preencher todo o interior do molde; caso contrário, faltará material no anel protetor da lente. Por outro lado, se o volume de material for maior do que o necessário (nesse caso, nota-se que o molde não se fecha completamente durante a moldagem), resultará uma lente grossa, além do desperdício de material.

O volume de material necessário para preencher o molde é de aproximadamente 50

² O aquecimento prolongado do acrílico provoca a sua despolimerização, o que pode ser notado pelo aparecimento de bolhas na amostra.

cm³. Esse volume pode ser calculado pela fórmula $V = e \cdot \pi (d/2)^2$, em que d é o diâmetro do disco e e é a sua espessura. Para um diâmetro igual a 70 mm, por exemplo, esse volume corresponderia a uma espessura aproximadamente igual a 13 mm. Embora d e e possam assumir muitos pares de valores correspondentes ao volume de 50 cm³, não é recomendável que e seja muito grande (ou que d seja muito pequeno), pois, por causa da alta viscosidade do material no estado fundido, resultará uma lente com muita tensão³. Na realidade, independentemente das dimensões do disco de acrílico, a lente moldada sempre sairá com tensões, apresentando problemas como birrefringência da luz, o que será analisado no capítulo VI.

Devido à alta viscosidade do Acrílico, a placa utilizada para a moldagem deve possuir as suas faces muito bem polidas, pois o molde, embora seja altamente polido, não retira nenhuma marca ou risco do material; ele apenas gera a curvatura da lente. As placas acrílicas comerciais são encontradas com qualidade e especificações que variam de fabricante para fabricante. Geralmente, elas medem de 1 a 1,5 m de largura e de 2 a 3 m de comprimento. Algumas possuem espessura que variam uniformemente ao longo da largura da placa; essa variação pode ser de até 15% do valor nominal da espessura. O preço, obviamente depende da qualidade e do volume de material. Para uma espessura de aproximadamente 12 mm, o metro quadrado de uma placa de boa qualidade pode ser encontrado por um preço em torno de 100 dólares (valor de 1996).

Para o corte das peças, são utilizados os recursos da oficina mecânica do próprio CDCC. Os discos acrílicos podem ser obtidos em três etapas: primeiro, utiliza-se uma serra circular para cortar a placa em pequenos quadrados com cerca de 9 cm de lado; em seguida,

³ No estado fundido, o efeito de *memória ótica* do acrílico, que é o retorno das partes do

utiliza-se uma serra de fita para tirar as arestas dos quadrados, resultando peças com formato parecido a um octógono; finalmente as peças são torneadas para a obtenção dos discos, com o diâmetro apropriado à espessura da peça. É recomendável que o papel adesivo à superfície da placa somente seja retirado após o torneamento da peça, para evitar riscos na superfície. Com esse procedimento, obtêm-se, de uma placa de 2 m² de área, umas 240 peças. Considerando-se apenas o custo do material, o custo de produção de cada lente será em torno de 0,85 dólares. Caso disponha-se de uma “serra-copo” com o diâmetro interno apropriado (em nosso caso, de aproximadamente 70 mm) e de uma máquina fresadora, na qual deve-se encaixar a serra, pode-se obter os discos de acrílico em uma única etapa. Devido ao formato da “serra-copo”, esse procedimento permite obter-se, de uma placa, um maior número de peças, em relação ao processo de três etapas descrito anteriormente. Obviamente isso pode significar maior economia e, conseqüentemente, um menor custo de produção.

IV.3.2 - O Aquecimento do Material

Devido à baixa condutividade térmica do material, os discos de acrílico não podem ser aquecidos no molde da prensa (como ocorre com o material granulado), visto que isso prolongaria muito o tempo de cada ciclo de moldagem, tornando o processo obsoleto. Embora o material granulado também possua uma baixa condutividade térmica, não é isso o que determina o seu aquecimento no molde na prensa, mas sim, os plastificantes misturados com os grãos do material, possibilitando o seu derretimento. Os discos acrílicos são aquecidos em estufa, antes de serem levadas à prensa. Várias delas são mantidas simultaneamente na estufa, de modo a encurtar ao máximo o tempo do ciclo de moldagem. Sendo t o tempo que cada

material aquecido à sua dimensão original, é muito forte.

peça deve permanecer na estufa, e t_c o tempo do ciclo de prensagem do material, o número de discos que devem permanecer na estufa é de t/t_c . Quando uma peça é retirada da estufa, outra deve ser colocada em seu lugar, de forma a manter esse número sempre constante. Assim, o processo de aquecimento do material ocorre paralelamente ao processo de prensagem do mesmo, de modo que o ciclo de moldagem fica independente do tempo de aquecimento do material.

Em geral, quando as placas acrílicas são aquecidas a uma temperatura entre 150 e 170 °C, elas tornam-se maleáveis como a borracha, podendo ser moldadas em formatos bastante complicados. Fornecedores⁴ do material recomendam que a temperatura de aquecimento não deve ultrapassar os 170 °C, e que a moldagem deve ser feita dentro de 15 min. após alcançada essa temperatura; para temperaturas entre 150 e 160 °C, o material pode ser aquecido por até 4 horas. Em princípio, sabemos que quanto maior a temperatura de aquecimento, maior será a maleabilidade do material. Entretanto, devido à degradação térmica, quanto maior for essa temperatura, menor deve ser o tempo de permanência do material na estufa. Na realidade, esses limites dependem do formato do molde, da pressão utilizada na moldagem e das características do material (a viscosidade depende do peso molecular médio e da eventual presença de plastificantes; a degradação térmica é influenciada pela presença de antioxidantes). No capítulo seguinte faremos, a esse respeito, uma breve caracterização de uma placa acrílica comercial.

Dentro da estufa, os discos de acrílico são colocados na posição vertical (“em pé”) sobre um trilho de metal, para não marcar a superfície do material. Para evitar qualquer confusão com a ordem das peças a serem retiradas da estufa, pode-se utilizar um trilho

⁴ CATÁLOGO DE CHAPAS E BLOCOS ACRÍLICOS BRASIPLEX. s.l., s.d..

circular, adotando-se um sentido para a colocação das peças a serem aquecidas. Para retirar a peça aquecida da estufa, pode-se utilizar uma luva de amianto, segurando a peça pelas bordas e tomando cuidado para não marcar a superfície da peça, desde a sua retirada da estufa até a sua colocação no molde da prensa.

IV.3.3 - A Moldagem por Compressão

A moldagem de uma lente tem início com o molde da prensa aberto e o anel lateral encaixado na parte de baixo do molde, ou seja, na fêmea (figura IV.3). O disco de acrílico, devidamente aquecido, é colocado na fêmea do molde.

Em seguida, a prensa é acionada até que o molde seja parcialmente fechado, apenas o suficiente para que ele seja vedado pelas borrachas “O’ring” (vide figura IV.4). Nesse momento, é necessário evacuar o molde, caso contrário, o ar ficará preso entre a superfície côncava do molde e o acrílico, resultando deformações na superfície da peça moldada.

O tempo de vácuo deve ser de aproximadamente 10 s. Após a evacuação do molde, a prensa é novamente acionada até que o molde se feche completamente, moldando assim o material no formato da lente. Devido ao forte efeito de “memória ótica” do acrílico, o molde deve permanecer fechado até que a peça se esfrie a uma temperatura abaixo da temperatura de amolecimento do material (que é de aproximadamente 105 °C). Em seguida, o molde é aberto e a lente retirada do molde. Para finalizar, o orifício do anel do molde, que serve para a evacuação do ar, deve ser desobstruído para a moldagem da peça seguinte. Essa desobstrução pode ser feita com um arame, ou com uma furadeira e broca com diâmetro de aproximadamente 4 mm.

Embora o sistema de refrigeração à água, para o resfriamento da peça, torne o processo mais rápido, um resfriamento mais lento pode aliviar as tensões do material. O tempo gasto para que a peça esfrie naturalmente dentro do molde é de aproximadamente 3 min..

Figura IV.3 - Foto da prensa. Destaque para o molde.

Figura IV.4 - Esquema do fechamento parcial do molde para sua evacuação

Resumidamente, o ciclo de moldagem pode ser dividido nas seguintes etapas:

- 1 - Colocação do material (pré-aquecido) no molde.
- 2 - Fechamento parcial do molde.
- 3 - Evacuação do molde.
- 4 - Fechamento completo do molde e moldagem da lente.
- 5 - Resfriamento da peça.
- 6 - Abertura do molde.
- 7 - Retirada da peça.
- 8 - Desobstrução do orifício de evacuação.

Com certa prática, esse ciclo de moldagem pode ser completado em aproximadamente 5 min.. Considerando-se apenas o processo de moldagem (sem considerar o corte da placa), o volume de produção pode chegar a quase 2.000 lentes/mês, em 40 h semanais de produção. Utilizando o sistema de refrigeração à água, o ciclo de moldagem fica ainda mais rápido e o volume de produção pode ser maior.

V - CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL UTILIZADO

Já que a qualidade da lente moldada não depende apenas do processo de moldagem, mas também, da qualidade do material utilizado na moldagem, este capítulo é dedicado à caracterização química e física do material utilizado na avaliação do processo. Para tanto, adquirimos uma placa acrílica “casting” (comercialmente conhecida como tipo “cristal”), importada pela empresa COMINAS.

V.3 - Peso Molecular (PM)

Como o processo de polimerização não é homogêneo, ou seja, os polímeros são misturas de moléculas de diferentes pesos moleculares, e também de diferentes estruturas, assim, o peso molecular de um polímero exibe uma distribuição gaussiana de tamanhos de cadeias moleculares, o que permite determinar apenas o peso molecular *médio* do polímero.

A análise do PM da amostra foi feita por Cromatografia de Permeação em Gel (GPC), utilizando-se Detetores “Waters” e software “Millenium 2010”, realizada pelo Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais (CCDM) da UFSCar. O resultado da análise foi uma curva de distribuição de pesos moleculares (figura V.1), com um pico correspondente a um PM em torno de 2.700.000 (Dalton).

Figura V.1 - Gráfico do peso molecular.

Esse resultado está bastante fora daquilo que deveríamos esperar para o Acrílico. Acontece que a metodologia adotada para a GPC utiliza curva de calibração segundo os padrões de Poliestireno, o que permite a obtenção de um PM de 500.000 a 1.000.000, que normalmente são os limites esperados para o PM do Acrílico. A metodologia adotada não tem sucesso para polímeros com PM fora desses limites, podendo, nesse caso, resultar valores incorretos, como provavelmente ocorreu no caso da nossa amostra. A única conclusão que podemos tirar dessa análise é que o PM da amostra provavelmente é maior do que 1.000.000.

Com base nessa análise, poderíamos esperar uma boa resistência mecânica do material; por outro lado, também poderíamos esperar uma alta viscosidade do material, o que exigiria uma temperatura de moldagem um pouco mais alta.

V.2 - Índice de Refração e Valor de Abbe

O índice de refração da amostra foi obtido através de um *Refratômetro* tipo Pulfrich da “Zeiss Jena”. O aparelho fornece um ângulo (de refração) para uma dada raia (c , d , e , F , g ou h). A cada ângulo corresponde um índice de refração, que é encontrado através de uma tabela.

Foram feitas 6 medidas, para cada raia, d , F , e c , a fim de se poder calcular o Valor de Abbe, $v_d = (n_d - 1)/(n_F - n_c)$; os resultados estão tabelados a seguir:

Tabela V.1 - Resultado das medidas do índice de refração para a amostra.

Amostras	n_d	n_F	n_c	v_d
1	1,4895	1,4956	1,4870	56,9
2	1,4921	1,4982	1,4896	57,2
3	1,4912	1,4969	1,4883	57,1
4	1,4917	1,4982	1,4896	57,2
5	1,4920	1,4982	1,4896	57,2
6	1,4930	1,5000	1,4910	58,1
Valor Médio	1,4917	1,4979	1,4892	57,3
Desvio Padrão	$1,3 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-3}$	$1,4 \times 10^{-3}$	0,4

Esses resultados estão de acordo com os valores encontrados na literatura. O desvio padrão das medidas do índice de refração, que é da ordem de 10^{-3} , dá-nos uma idéia da homogeneidade do material.

V.3 - Transmissão Luminosa

O aparelho utilizado para a caracterização da transmissão de luz foi um *Espectrofotômetro* “Cary 17” da “Varian”. A caracterização foi feita para a região do espectro correspondente à luz visível e aos raios ultravioletas de baixa frequência. Foram feitas medidas para a amostra comercial e também para uma amostra sem aditivos, polimerizada em laboratório. O resultado está expresso no gráfico da figura V.2. A curva *a* (amostra “pura”) é a que mais aproxima-se dos valores encontrados na literatura (figura II.1). Observa-se que a amostra comercial absorve os raios ultravioleta mais do que a amostra “pura”. Isso é razoável se considerarmos que a amostra comercial contém aditivos (que absorvem os raios UV), enquanto que a amostra “pura”, não. A Curva *b* revela que o

acrílico comercial possui uma transmissão de aproximadamente 95 %¹, para um comprimento de onda em torno de 400 nm. Segundo a lei de Fresnel, por causa da reflexão da luz na superfície do material, a perda na transmissão deveria ser superior a 7,5 %, para o Acrílico. É provável que o papel adesivo à superfície da placa comercial, para a proteção da mesma, tenha causado um efeito anti-refletor na superfície. Vemos, na curva *a*, que a transmissão não ultrapassa os 93 %. Esse resultado é razoável, se considerarmos que a precisão da nossa medida é de aproximadamente 1%.

Amostras do material comercial, após serem aquecidas por 40 min, a 200 °C, praticamente não apresentaram perda na transmissão total de luz.

V.4 - Temperaturas de Moldagem

No capítulo anterior, vimos que, para uma determinada temperatura de aquecimento do material, há um tempo máximo, acima do qual, o material começa a degradar-se. Por outro lado, também há um limite mínimo para o tempo de aquecimento, abaixo do qual, o material não estará suficientemente amolecido para amoldar-se completamente à fôrma.

Fizemos um levantamento dos limites, inferior e superior, do tempo de aquecimento do material, para várias temperaturas. O formato do molde utilizado está descrito no capítulo IV (figura IV.2), e a pressão de moldagem é de aproximadamente 170 bar. O resultado foi colocada em um gráfico de temperatura de aquecimento (T) por tempo de aquecimento (t) (figura V.3).

¹ Para pequenas espessuras, como as que foram tratadas neste capítulo, a transmissão de luz (visível) em uma amostra de acrílico varia muito pouco com a espessura da amostra (ALMAND, 1972).

Figura V.2 - Espectro de transmissão: a) Acrílico puro; b) Acrílico comercial.

Figura V.3 - Caracterização de moldagem do Acrílico.

O gráfico pode ser interpretado da seguinte maneira: Para qualquer ponto do gráfico, correspondente a uma temperatura e um tempo de moldagem, situado abaixo da curva inferior (região 1), o material não estará suficientemente aquecido para a moldagem. Quanto mais distante o ponto estiver desta curva, menos amolecido estará o material, e a peça moldada será defeituosa. Nesse caso, inicialmente, apenas as bordas da lente (o anel protetor) deixam de ser perfeitamente moldadas; mas à medida em que a peça esteja ainda menos amolecida para a moldagem, então a própria curvatura da lente deixará de ser gerada, podendo até ocorrer trincas na peça. Para qualquer ponto situado acima da curva superior (região 3), resultará a degradação do material, o que é notório pelo aparecimento de bolhas no interior da peça aquecida (despolimerização). Quanto mais o ponto se distanciar dessa curva, mais rapidamente e intensamente as bolhas surgirão.

Ainda que o gráfico anterior dependa da qualidade do material utilizado, do formato do molde e também da pressão de moldagem, provavelmente, deveremos esperar um gráfico com os mesmos tipos de curvas para outras placas acrílicas, outros formatos de molde e outras pressões de moldagem.

VI - PROPRIEDADES ÓTICAS DAS LENTES MOLDADAS

Os testes de qualidade ótica da lente moldada foram baseados principalmente nos seguintes procedimentos:

- 1 - Determinação do raio de curvatura.
- 2 - Aberrações Esféricas.
- 3 - Birrefringência Induzida por "stress".
- 4 - Qualidade da Superfície Moldada.

VI.1 - Determinação do Raio de Curvatura

Os raios de curvatura da lente e do molde foram determinados na oficina de ótica do IFSC, pelo método de reflexão de luz na superfície de teste. Para tanto, utiliza-se um sistema de luz colimada e um trilho graduado. A precisão do método gira em torno de 0,05 cm. Para as condições ideais de moldagem do material (vide gráfico V.3 - região 2), o raio de curvatura obtido para as lentes, bem como para o molde é $R = 10,00$ cm.

VI.2 - Aberrações Esféricas

A esfericidade da lente é determinada através de interferogramas obtidos de um interferômetro de Fizeau (Zygo), que utiliza o método de reflexão de luz na superfície da amostra. O funcionamento do interferômetro é ilustrado pelo esquema da figura VI.1. Em

Figura VI.1 - Esquema de funcionamento do Interferômetro de Fizeau

nosso caso, em que o objeto de teste é esférico, o padrão também o é.

Foram feitas medidas para duas lentes, moldadas a temperaturas diferentes, e também para uma lente comercial (de material injetável) encontrada no mercado. Os resultados estão apresentados nas figuras VI.2 - VI.4. Comparando as figuras com o catálogo (Zygo) de representação de interferogramas, pudemos constatar que as duas lentes moldadas por compressão (fig. VI.2 e VI.3) possuem aberração esférica e astigmatismo.

Figura. VI.2- Interferograma de uma lente acrílica moldada a $T = 140^{\circ}\text{C}$, com 30 min. de aquecimento: Aberração Esférica + Astigmatismo.

Figura VI.3 - Interferograma de uma lente acrílica moldada a $T = 210^{\circ}\text{C}$, com 32 min. de aquecimento: Aberração Esférica + Astigmatismo).

Figura. VI.4 - Interferograma da lente plástica comercial: Aberração Esférica.

Devido à alta refletividade da superfície metálica do molde, que satura o detetor do interferômetro, não foi possível obter o interferograma do molde. Nenhum outro instrumento de medida com baixa precisão poderia ser usado para o molde, a fim de comparação com os interferogramas das lentes, pois a precisão do interferômetro é da ordem de grandeza de nanômetros. Como, entretanto, mesmo para a lente moldada a uma temperatura mais alta (o que deveria possibilitar uma boa moldagem) obtém-se *asfericidade* (falta de esfericidade) na superfície da lente, é provável que o próprio molde possua as superfícies asféricas.

O interferograma da lente comercial revela apenas aberração esférica. Nesse caso, é importante destacar que o molde de uma injetora é feito com material nobre, e que portanto, permite alta precisão técnica.

Contudo, é interessante observar que a qualidade visual aparente das imagens

formadas, quando a lente é utilizada como uma lupa, não depende dos fatores acima discutidos. Na figura VI.5, comparamos a imagem obtida por uma lente acrílica e a imagem obtida por uma lente de vidro comum utilizada no ensino superior.

Figura VI.5 - Aumento de uma figura (a), causado por uma lente de vidro (b) e por uma lente acrílica (c).

VI.3 - Birrefringência Induzida por "Stress"

Para determinar o efeito da birrefringência induzida, foi realizado um ensaio, no qual a lente é colocada entre dois polarizadores cruzados. As figuras VI.6 - VI.9 mostram os resultados obtidos para lentes moldadas a diferentes temperaturas com um mesmo tempo de aquecimento. Nota-se que quanto menor a temperatura de aquecimento, maior a concentração de tensão (“stress”) na lente moldada. Isso significa que quanto maior for a viscosidade do material aquecido, maior será também a tensão interna na lente. O padrão de uma lente plástica comercial (figura VI.9) apresenta pouca birrefringência induzida, pois, nesse caso, o material moldável é injetável e possui baixa viscosidade. A tensão induzida, entretanto, não depende apenas da viscosidade do material fundido, mas também deve depender do formato do molde; quanto mais complicado for esse formato, maior será a tensão interna apresentada na peça moldada.

Devido à simetria, tanto bilateral como circular, no processo de prensagem do material, o eixo ótico de birrefringência deveria estar na direção perpendicular ao plano da lente. Isso implicaria que os padrões de birrefringência deveriam ter simetria perfeitamente circular, o que não é observado nas figuras obtidas. Acontece que quando o material aquecido é colocado no molde, nem sempre é possível deixá-lo exatamente centralizado; assim, durante a moldagem, o material é tensionado mais para um determinado lado.

Contudo, a birrefringência induzida na lente, aparentemente, não causa nenhum efeito de dupla imagem.

Figura VI.6 - Polarizadores cruzados - lente moldada a 130 °C, com 35 min. de aquecimento. Obs.: muita tensão no centro da lente

Figura VI.7 - Polarizadores cruzados - lente moldada a 140 °C, com 35 min. de aquecimento.

Figura VI.8 - Polarizadores cruzados - lente moldada a 210 °C, com 35 min. de aquecimento. Obs.: pouca tensão no centro da lente

Figura VI.9 - Polarizadores cruzados - lente comercial moldada por injeção. Obs.: pouca tensão.

VI.4 - Qualidade da Superfície moldada

Observou-se que, mesmo para as condições ideais de temperatura e tempo de aquecimento do material, a superfície das lentes moldadas apresentam poros ("micro-crateras"), que podem ser vistos à "olho nu". Análises feitas num microscópio Olympus revelaram que, nas proximidades desses poros, aparecem micro-fraturas, o que indica serem os poros provenientes de micro-bolhas no interior do material. Verifica-se uma tendência de diminuição do número desses poros com a diminuição da temperatura de aquecimento do material. Isso deixa evidente que essas micro-bolhas são provenientes da degradação térmica, ou no caso do acrílico, despolimerização; quanto maior a temperatura de aquecimento do material, maior a degradação. Para uma temperatura abaixo de 140 °C, a despolimerização deixa de ser significativa, e a superfície da lente moldada já não apresenta poros perceptíveis à "olho nu".

A limpeza da superfície pode ser feita com algodão e detergente diluído (para não atacar quimicamente a superfície). Esse procedimento ainda provê uma proteção anti-estática temporária à superfície da lente.

VII - CONCLUSÕES E NOVAS PROPOSTAS

O procedimento

O desenvolvimento, e mesmo a operação, do processo de moldagem dependem de tecnologia, recursos e mão-de-obra da própria Universidade. O volume de produção é de aproximadamente 2.000 unidades/mês. Isso implica um custo total de cada lente em torno de U\$ 1,70. Esse valor, que pode ser mais baixo (cap. IV), ainda é muito menor do que o preço de uma lente de vidro comum, que fica em torno de U\$ 20,00. Para vidros especiais, como o BK7, uma lente pode chegar ao dobro desse valor.

Características do material moldável

Devido à alta viscosidade do material no estado fundido, a tensão induzida (e consequentemente a birrefringência) é um fator inerente ao processo de moldagem.

Um dos aspectos positivos do processo é a alta qualidade ótica do material utilizado. Mesmo após o aquecimento da placa acrílica, a sua alta transparência praticamente não foi afetada. O material ainda permite uma lente com pouca aberração cromática, uma vez que ele é pouco dispersivo.

Qualidade ótica das lentes

É provável que as aberrações esféricas das lentes moldadas sejam devidas à asfericidade do próprio molde. O material utilizado para confecção do molde, o aço inox,

não é dos melhores.

A birrefringência desenvolvida na lente depende da temperatura de moldagem do material; quanto maior for a temperatura, menor será o grau de birrefringência induzido na lente. Isso, entretanto, aparentemente não causa nenhum efeito de dupla imagem na lente; e portanto para a maioria das experiências realizadas no ensino de Ótica, esse problema é irrelevante.

Embora as condições ideais de moldagem do material analisado sejam descritas pelo gráfico da figura V.3, observa-se que quanto menor for a temperatura de aquecimento do material moldável, menor será o número de poros na superfície da lente moldada, e consequentemente, melhor será a sua qualidade.

É interessante observar que experiências simples de ótica geométrica (medida de foco, e geração de imagens) não dependem dessas aberrações. Esse fato vem reforçar ainda mais proposta de utilização destas lentes no ensino básico de ótica. Isso não significa, entretanto, que seja impossível obter lentes acrílicas de mais alta qualidade, pelo processo em questão. Pelo contrário, o presente trabalho aponta-nos caminhos que deverão possibilitar a produção de lentes acrílicas adequadas para instrumentos óticos de alta precisão.

Propostas para trabalhos futuros

- **Modificação do molde:** Uma possível modificação do molde, diminuindo as bordas (o anel protetor) da lente, suavizando as curvas entre a lente e as suas bordas, ou até mesmo dispensando essas bordas, pode permitir uma moldagem perfeita do material mesmo para baixas temperaturas de aquecimento. Isso deve resultar uma lente com pouca birrefringência, e com uma superfície livre de porosidade. Outros metais menos porosos do que o aço inox podem ser depositados na superfície do molde, melhorando

ainda mais a qualidade técnica da lente moldada.

- **Produção de espelhos esféricos:** Testes preliminares feitos com a deposição de alumínio na superfície do acrílico mostraram que a aderência é muito eficiente, possibilitando assim uma possível aplicação na confecção de espelhos esféricos e parabólicos.

VIII - BIBLIOGRAFIA

- ALMAND, P., BYRD, R. New developments in plastics for optical applications. *Materials Engineering*, p.42-45, nov.1972.
- BRANDRUP, J., et al. *Polymer handbook*. 2.ed. New York, Wiley & Sons, 1975, p.V55-61.
- CATÁLOGO DE CHAPAS ACRÍLICAS DA METACRIL. São Paulo, s.d.
- CATÁLOGO DE CHAPAS E BLOCOS ACRÍLICOS BRASIPLEX. s.l., s.d.
- CATÁLOGO DE INSTRUMENTOS ÓTICOS DA MELLES GRIOT. s.l., 1995/1996.
- CATÁLOGO DE PEÇAS ACRÍLICAS ACRIRESINAS. São Paulo, s.d..
- CATÁLOGO DE VIDRO ÓTICO DA SCHOTT. s.l., 1986.
- DE VANY, A.S. *Master optical techniques*. New York, Wiley & Sons, 1981.
- ENCICLOPÉDIA MIRADOR INTERNACIONAL. São Paulo, 1992. v.18, p.8979-8981/ 9812-9818.
- GRASSIE, N., SCOTT, G. *Polymer degradation and stabilisation*. New York, Cambridge University Press, 1988.
- GUEDES, B., FILKAUSKAS, M.E. *O plástico*. São Paulo, Érica, 1986.
- HECHT, E., ZAJAC, A. *Optics*. USA, Addison - Wesley, 1974.
- HORNE, D.F. *Optical production technology*. New York: Russak & Company, 1972.
- _____ *Optical production technology*. 2. ed. Bristol, Adam Hilger, 1983. cap. 8, p.253-59.
- _____ *Spectacle lens technology*. Bristol: Adam Hilger, 1978. Cap. 7.
- KAYE, S. L. *Plastics*. Part 3. USA, International Textbook Company, 1945.

- LEONARD, M. Plastic optics: quality at a bargain. *Machine Design*, n.5, p.76-81, aug. 1971.
- LEVI, L. *Applied optics*. New York: Wiley & Sons, 1980. Cap. 10.
- MANO, E.B. *Introdução à polímeros*. São Paulo, Edgard Bücher, 1985.
- MEETEN, G.H. *Optical properties of polymers*. New York, Elsevier, 1986.
- PERUCCA, E. *Física general y experimental*. 2.ed. Barcelona, Labor, 1953. V.2.
- PRADO, L.C. *Ótica geométrica*. São Paulo, Politécnica, 1953.
- RANBY, B., RABEK, J.F. *Photodegradation, photo-oxidation and photostabilization of polymers*. Bristol, Wiley & Sons, 1975.
- REICH, L., STIVALA, S.S. *Elements of polymer degradation*. New York, McGraw-Hill, 1971.
- RODRIGUEZ, F. *Princípios de sistemas de polímeros*. México, D.F.: El Manual Moderno, 1984.
- SAVGORODNY, V.K. *Transformación de plásticos*. Barcelona: Gustavo Gili, 1978.
- SCHIEL, D., et al. *Desenvolvimento e aplicação tecnológica de poli (Metacrilato de Metila) para a produção de novos materiais didáticos de matemática, física e química*. São Carlos, USP/CDCC, 1990.
- SEARS, F.W., ZEMANSKY, M.W. *Física*. Rio de Janeiro, LTC, 1973. V.2.
- THE HANDBOOK OF PLASTICS OPTICS*. 2.ed. Ohio: U.S. Inc. Precision Lens, 1983.
- UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO/ COORDENADORIA DE DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA E CULTURAL. São Carlos, 1995. *Subprograma para ensino de ciências: produção de um laboratório completo para o ensino de Ótica*. São Carlos, 1995. 13 p. (Proposta de projeto).
- WOLPERT, H.D. A close look at optical plastics. Part 1: The methods and the materials. *Photonics Spectra*, p.68-71, feb. 1983.
-
- A close look at optical plastics. Part 2: Manufacturing and production tolerances. *Photonics Spectra*, p. 63-66. mar. 1983.