RICARDO VERA TORRES

Estudo de Retificação de Vidros Ópticos

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Assoc. Jaime Gilberto Duduch

DEDICATÓRIA

À minha família pela compreensão e apoio, em especial ao meu filho Ramón, pelos momentos que nos privamos de estar juntos, pelo seu olhar afetuoso e compreensível o qual me dá forças.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelas oportunidades e ânimo em todos os momentos.

Ao Prof. Dr. Jaime Gilberto Duduch pela orientação e por acreditar nesse trabalho.

Ao Prof. Dr. Renato Goulart Jasinevicius, pelo fornecimento de informações e sugestões.

À Luciane pela ajuda e apoio para este trabalho.

Ao Carlos Burato pelas observações e sugestões de grande valor para o enriquecimento do trabalho.

À Luciana pelo apoio e ajuda na condução e formatação do trabalho.

Ao João Paulo pela ajuda durante os experimentos.

À Ana Paula pela sua paciência e ajuda prestada.

RESUMO

TORRES, R. V. **Estudo de Retificação de Vidros Ópticos** . 2006. 104 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

O desenvolvimento de sistemas ópticos, o uso do laser e conseqüentemente a necessidade de superfícies refrativas com alto grau de acabamento e precisão estão aumentando significativamente a demanda por pesquisas na usinagem de alta precisão. As superfícies obtidas com os usuais processos de polimento são limitadas a formas planas, cilíndricas e esféricas e requerem muito tempo para se obter resultados satisfatórios. A retificação de materiais frágeis é uma alternativa ao polimento e lapidação e os resultados obtidos mostram que o uso de um torno de alta precisão com um cabeçote retificador é uma proposta viável para a geração de superfícies anesféricas. Este trabalho trata do estudo de retificação de vidros ópticos e objetiva a definição dos parâmetros de usinagem para a obtenção do acabamento superficial desejado, mostra a influência do avanço na rugosidade e estuda o efeito da variação do avanço e da rotação do rebolo. Como principais resultados tem-se a definição da melhor condição de avanço e rotação e uma comparação com outros trabalhos apresentados com dressagem eletrolítica e sem este recurso, concluindo-se que é possível e viável a retificação de vidros ópticos em uma retificadora de alta precisão e que a possibilidade de variação de rotação do rebolo é um fator diferencial.

Palavras chave: **retificação, vidro óptico, superfícies anesféricas, rebolo de diamante.**

ABSTRACT

TORRES, R. V. **A Study of Optical Glasses Grinding**. . 2006. 104 f. Dissertation (Master of Science) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

The development of optical systems, the use of laser and consequently the need of refractive surface with high finish levels and precision are increasing significantly the demand for research on high precision machining. The surfaces obtained with the usual polishing process are limited in plane, cylindrical and spherical shape and spend a lot of time to obtain a good result. The grinding of brittle materials is an alternative to polishing and lapping and the results shown that the use of a high precision lathe with a grinding spindle is a viable proposition to generate aspherics surfaces. This is a study of optical glasses grinding and the objective is to define the grinding parameters to achieve the smoothness desired, it shows the influence of feed rate in the smoothness and study the effects of feed rate and diamond wheel rotation. As the main results, is showed the best condition of feedrate and rotation and a comparison with another work with *electrolytic in process dressing (ELID)* and without this resource, and the conclusion is that is possible and feasible to grind optical glass with a high precision grinding machine and the possibility to vary the diamond wheel rotation is a diferencial.

Keywords: **grinding, optical glass, aspherics surfaces, diamond wheel**

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	Dependência dos danos causados à superfície em função do índice de ductibilidade (LLE REVIEW, VOL 73)	24
FIGURA 2	Curva – Índice de refração (n) x Comprimento de Curva índice de refração (n) x Comprimento (λ) BK 7 (WIKIPEDIA®, 2005).	28
FIGURA 3	Tipos de vidros – Diagrama nd-vd (Sumita Optical Glass, 2002).	31
FIGURA 4	Tipos de vidros – Diagrama Θ g,F-vd (Sumita Optical Glass, 2002).	31
FIGURA 5	Calcita, variedade de espato da Islândia, mostrando a birrefringência (WINGE et al, 2001).	33
FIGURA 6	Bolhas geradas pelo reaquecimento pressurizado do N-BK 7 (SCHOTT OPTICAL GLASS, 2005).	34
FIGURA 7	Representação esquemática e visualização de um feixe de laser atravessando uma lente bi convexa (WIKIPEDIA, 2006).	36
FIGURA 8	Representação esquemática e visualização de um feixe de laser atravessando uma lente bicôncava (WIKIPEDIA, 2006).	37
FIGURA 9	Diferenças entre lentes esféricas e lentes anesféricas – em lentes anesféricas, a mudança contínua de curvatura na direção do diâmetro da lente concentra a luz em um	

	único ponto (CANON TECHNOLOGY, 2005).	38
FIGURA 10	(a) lentes de vidro obtidas por moldagem, (b) molde para obtenção de lentes.	39
FIGURA 11	Alguns tipos de aberrações ópticas (TISCALI, 2005).	42
FIGURA 12	(a) dispersão de um espectro visível em uma lente. (b) correção da aberração cromática com a utilização de uma par de lentes (KENNETH et al, 2005).	43
FIGURA 13	Representação esquemática do astigmatismo	44
FIGURA 14	Vista lateral e disco aerado de uma estrela brilhante entrando a 25°, mostrando astigmatismo.	45
FIGURA 15	Astigmatismo de $\frac{1}{4}$ de onda em um telescópio desobstruído.	45
FIGURA 16	A imagem a esquerda foi gerada por um refrator perfeito de 6" e a imagem à direita do mesmo telescópio com onda 0,5 de astigmatismo (x/y) (KENNETH , 2005).	45
FIGURA 17	Representação esquemática da aberração esférica	46
FIGURA 18	Imagem de uma estrela com aberração esférica (KENNETH, 2005).	47
FIGURA 19	Representação esquemática do <i>coma</i> . (KENNETH, 2005).	47
FIGURA 20	Imagem de uma aberração <i>coma</i> (KENNETH, 2005).	48
FIGURA 21	As imagens acima mostram uma aberração <i>coma</i> no eixo X de $\frac{1}{4}$ de onda para um telescópio desobstruído	48

FIGURA 22	Curvatura de campo. Principalmente mais visível nas bordas do campo (KENNETH, 2005)..	49
FIGURA 23	Uma imagem (a) livre de distorção, (b) com a chamada “Barril” e (c) com a chamada “Almofada de alfinetes” (KENNETH, 2005).	49
FIGURA 24	(a) Imagem de Saturno com aberração de 5”, 30% obstruída , (b) o mesmo telescópio mas com 1/20 de rugosidade adicionada, e 9c) a subtração das imagens (a) e (b) (KENNETH, 2005).	50
FIGURA 25	Dureza (K 100) e resistência à temperatura (°C) de materiais abrasivos (LMP KÖNIG apud. ZEILMANN,2004).	53
FIGURA 26	Mecanismo de desgaste do rebolo (MALKIN, 1989).	55
FIGURA 27	Representação esquemática do ELID (MURATA et al in apud RAMAN et al, 2003).	56
FIGURA 28	Exemplo de especificação de rebolos abrasivos conforme ANSI (MALKIN, 1989).	57
FIGURA 29	Estrutura do vidro e do cristal (SINHOF, 1996).	58
FIGURA 30	Propagação de trincas em diferentes materiais (SINHOF, 1996).	59
FIGURA 31	Profundidade da trinca causada pela penetração do grão (SINHOF, 1996).	60
FIGURA 32	Estágios de formação da trinca (SINHOF, 1996).	60
FIGURA 33	Formação de fratura (BIFANO in apud SINHOF, 1996).	61

FIGURA 34	ASG (<i>Aspheric Surface Generator</i>) Rank Pneumo (Rank Taylor Hobson), sem o cabeçote retificador	65
FIGURA 35	Placa ranhurada para fixação do suporte de alumínio	66
FIGURA 36	Cabeçote retificador	67
FIGURA 37	Detalhe do eixo árvore e peça a ser retificada	67
FIGURA 38	Aquecedor elétrico Fisatom	69
FIGURA 39	Amostra fixada sobre o suporte de alumínio.	70
FIGURA 40	Detalhe – preparação de uma amostra. Verificação do batimento radial e axial	70
FIGURA 41	Ultra som Julabo USR 1 (35 kHz, 60w)	71
FIGURA 42	Sistema de medição Form Talysurf® da Taylo Hobson	73
FIGURA 43	Componentes básicos do sistema de medição Talysurf® Intra portátil	74
FIGURA 44	Medição com apalpador	74
FIGURA 45	Medição da amostra de vidro com o equipamento Talysurf® Intra	75
FIGURA 46	Equipamento de medição Talysurf CCI 3000 A ®	76
FIGURA 47	Componentes básicos do sistema de medição Talysurf	78
FIGURA 48	Posição dos pontos de microscopia e medição de rugosidade	81
FIGURA 49	Transição de rugosidade ponto 16 (a) avanço 10^{-5} mm (b) avanço 10^{-4} mm	82
FIGURA 50	Modelo de transição (vidro <i>Schott</i> FK51) – Dútil x Frágil (SINHOF,1996)	82

FIGURA 51	Fraturas superficiais e sub superficiais causadas na retificação do BK7 mostrando a transição do regime frágil para o regime dúctil	83
FIGURA 52	(a) e (c) rugosidade e (b) microscopia óptica do ponto 13 (Ra 0,017693 μm ; Rq 0,034749 μm ; $V_s=580$ rpm; $f=10^{-4}\text{mm}$)	84
FIGURA 53	Rugosidade na faixa do ponto 13. Talysurf (Ra 0,02 μm ; Rq 0,0296 μm)	84
FIGURA 54	(a) e (c) Rugosidade e (b) microscopia óptica do ponto 12 (Ra 0,024092 μm ; Rq 0,035642 μm ; $V_s=1480$ rpm; $f=10^{-4}\text{mm}$)	85
FIGURA 55	(a) e (c) Rugosidade e (b) microscopia óptica do ponto 14 (Ra 0,017997 μm ; Rq 0,025553 μm ; $V_s=6000$ rpm; $f=10^{-5}\text{mm}$)	86
FIGURA 56	(a) e (c) Rugosidade e (b) microscopia óptica do ponto 15 (Ra 1,37768 nm; Rq 1,80757 μm ; $V_s=9400$ rpm; $f=10^{-5}\text{mm}$)	87
FIGURA 57	Condições iniciais da amostra de vidro no ponto 1 (Ra 3,00546 nm, Rq 1,03427nm).	88
FIGURA 58	Tabela de correlação rotação/avanço e rugosidade	89
FIGURA 59	Pareto de correlação rotação/avanço e rugosidade	90
FIGURA 60	Comparativo de retificação com ELID e sem ELID (OHMORI,2001)	91

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	Exemplos de designações do tipo de vidro de acordo com o fabricante	20
TABELA 2	Tipos de vidros e suas abreviações	22
TABELA 3	Parâmetros de usinagem	64
TABELA 4	Propriedades da amostra BK7	68
TABELA 5	Características geométricas do rebolo de diamante	72
TABELA 6	Especificações do Talysurf®	75
TABELA 7	Características do Talysurf CCI 3000 A®	79
TABELA 8	Especificações do Talysurf CCI 3000 A®	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANSI – American National Standards Institute

ASME- Sociedade Americana de engenheiros mecânicos (*American Society of Mechanical Engineers*)

ASPH, AL- Denominações utilizadas para lentes anesféricas

CBN – Nitreto de Boro cúbico

CNC – Comando Numérico Computadorizado

D- Diamante

d_c - profundidade de penetração crítica para início da fratura

DIN- Instituto Alemão de Normas (*Deutsch Institut für Normung*)

ELID- Dressagem Eletrolítica em processo contínuo (*Electrolytic In process Dressing*)

IR- Infra vermelho

V_s – Velocidade tangencial do rebolo

V_w - Velocidade do rebolo (rpm)

UV- Ultra violeta

LISTA DE SÍMBOLOS

E	-	Módulo de Young
E_f	(J)	Energia para formação de fratura
E_p	(J)	Energia de escoamento plástico
Δ_p	-	Desvio da dispersão parcial
f	mm/rev	Avanço
λ	nm	Comprimento de onda
$n_{(d)}$	-	Índice de refração
ν_d	-	Dispersão baseada na linha d do espectro
ν	-	Dispersão, número de Abbe (Abbezahl)
ν_e	-	Dispersão baseada na linha e do espectro
$P_{C,S}$	-	Dispersão parcial relativa
$P_{g,F}$	-	Dispersão parcial relativa
T	-	Transmissividade interna
Ψ	-	Constante adimensional dependente da geometria do indentador

SUMÁRIO

1 Introdução	15
2 Revisão bibliográfica	17
2.1 Vidros	17
2.2 Vidros Ópticos	18
2.3 Lentes	36
2.4 Óptica	40
2.5 Rebolo diamantado	51
2.6 Fatores de influência no acabamento final	58
3 Metodologia do ensaios	64
4 Resultados e discussões	81
5 Conclusões	92
6 Bibliografia	95

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

O crescente desenvolvimento de tecnologias que usam utilizam lasers, espelhos e lentes para sistemas ópticos e a demanda pela redução de custos de produção e aumento de qualidade como importante fator para a competitividade das indústrias, geraram a necessidade de desenvolver métodos e processos para a obtenção de superfícies com alto grau de acabamento (micro topografia). Dessa forma os métodos atuais de polimento e lapidação são limitados no aspecto quantitativo.

1.2 Objetivo

O objetivo do trabalho é estudar o processo de retificação de materiais frágeis em uma retificadora de ultraprecisão com rebolo de diamante, definindo-se parâmetros de corte para a obtenção de superfícies com o grau de acabamento de 2 nm (Ra), atingindo dessa forma resultados satisfatórios, restando apenas o polimento da superfície. Foram usinadas superfícies sob diferentes condições de usinagem e posteriormente verificado o acabamento das peças. Foi investigada a influência gerada pelo avanço e rotação e comparada a influência do desgaste do rebolo. A superfície foi analisada em um microscópio óptico e o resultado foi um estudo estatístico dos parâmetros de processo.

1.3 Justificativa e Motivação

A retífica de alta precisão é um campo inexplorado, e o desenvolvimento é decisivo para a viabilidade econômica da produção de lentes e espelhos. Outro importante fator é a possibilidade de geração de superfícies anesféricas com alto grau de precisão com um equipamento CNC, este tipo de superfície não pode ser obtida pelos processos convencionais de polimento e lapidação, sendo assim restritos a superfícies planas e esféricas.

1.4 Estrutura do trabalho

A estrutura do trabalho está na forma de capítulos, conforme conteúdo a seguir:

- O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica, enfocando os tipos de vidros ópticos, (classificação, principais características, fabricantes e tabelas). Características e fenômenos ópticos, comparações entre lentes esféricas e anesféricas, processos de fabricação de lentes e suas vantagens e desvantagens. Tipos de abrasivos disponíveis no mercado e suas aplicações, mecanismo de remoção de material e desgaste do rebolo.
- O Capítulo 3 aborda a metodologia adotada para os ensaios, procedimentos de montagem e planejamento experimental;
- O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos e as discussões do trabalho.
- No Capítulo 5 encontram-se as conclusões e recomendações para novos trabalhos.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

CARACTERÍSTICAS DOS VIDROS, SISTEMAS ÓPTICOS E

RETIFICAÇÃO DE VIDRO

2.1 Vidros

Vidros são produtos inorgânicos transparentes, que são produzidos através da fusão conjunta de materiais inorgânicos selecionados e resfriando o produto fundido sem permitir sua cristalização.

Freqüentemente questões são levantadas se vidro é um líquido super resfriado ou não, a resposta parece ser mais complexa do que as pessoas esperam. Alguns documentos, autores e professores reivindicam que se podem encontrar igrejas antigas com janelas que podem revelar uma diferença entre as espessuras superior e inferior, assim o vidro seria capaz de fluir apenas pela ação do próprio peso, ainda que muito lentamente, esta é a prova para a reivindicação de que o vidro é um líquido muito viscoso.

Estas janelas podem ser encontradas e são mais finas no topo, mas não há uma evidência de que não sejam de imperfeições do processo de fabricação daquele tempo. Esse é mais um mito que circula não só entre o público leigo, mas também no meio científico,

A idéia parece ter um embasamento científico, uma vez que o vidro é comumente descrito como um líquido super-resfriado, sendo sua estrutura semelhante à estrutura desordenada de um líquido, mas sem o movimento molecular característico da fase líquida (como se as moléculas do líquido tivessem seu movimento "congelado"). Sólidos com

estruturas desordenadas como as do vidro são chamados de amorfos (e, às vezes, de vítreos), em contraste com os sólidos cristalinos, que têm seus átomos dispostos em uma estrutura ordenada e repetitiva. Alguns materiais podem mudar de uma estrutura cristalina para amorfa e vice-versa, de acordo com a temperatura, e este fenômeno está por trás da criação do CD regravável.

Mas ainda que esta semelhança exista, o vidro é um sólido a temperatura ambiente. A temperatura a partir da qual o vidro começa a fluir, a chamada "temperatura de transição vítrea", é de 550°C para o vidro comum. A medição desta temperatura é afetada por quanto tempo estamos dispostos a esperar o material fluir. Se esperarmos tempos maiores, conseguiremos observar o vidro fluir a temperaturas mais baixas. Mas mesmo para tempos "infinitamente" longos, onde obviamente não é possível obter esta temperatura através de experiências no laboratório, calcula-se que esse valor caia para perto de 300°C, ainda bem acima da temperatura sob a qual os painéis de vidro das catedrais são mantidos. Dessa forma pode evidenciar que os vidros se tratam de sólidos à temperatura ambiente com estrutura amorfa. (Zanotto, 1998).

2.2 Vidros Ópticos

Comparados com os vidros “normais”, vidros ópticos são extremamente caros e sofisticado para manufaturar, não somente o processo de fundição, mas o próprio processo de resfriamento é uma arte por si só. Este resfriamento é freqüentemente chamado de “resfriamento fino” tendo que ser observado estritamente os gradientes de temperatura e tempo - não muito lentamente para evitar a cristalização do produto, mas também não tão rápido para manter a homogeneidade do vidro para aplicações ópticas. Esta faixa de

temperatura, que cobre a maior faixa de viscosidade dos vidros, está situada entre duas temperaturas – a temperatura de transformação e a temperatura de agregação. A viscosidade entre estes dois pontos cobre uma faixa de 10 até 10^{13} Poise ($1 \text{ Poise} = 1 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1} \text{ s}^{-1}$) e uma faixa de temperatura acima de 1400°C até uma faixa de 350°C a 600°C , dependendo do tipo de vidro óptico produzido (NYMAN, 2005).

Este processo é extremamente exato e reproduzível para assegurar que as constantes ópticas do vidro são tanto idênticas quanto praticáveis para 5 dígitos após a vírgula. De fato, a despeito de todos os controles cuidadosos e monitoramento de muitos parâmetros, o processo de fundição é diferente para cada bloco de vidro, então cada bloco leva um número de produção para identificação, que está ligado a todo um conjunto de constantes ópticas, que são medidas e documentadas. Este procedimento permite que os projetistas ópticos através de um ajuste fino de tolerâncias mantenham o desempenho do projeto de acordo com o vidro disponível, este ajuste fino é mandatório e essencial para o alto desempenho de lentes e sistemas ópticos (NYMAN, 2005).

2.2.1 Denominação e caracterização de vidros ópticos

As denominações dos vidros ópticos mostradas na TABELA 2 são do maior e mais conhecido fabricante de vidros - *Schott* na Alemanha. Outros grandes fabricantes de vidros ópticos são *Corning USA*, *Pilkington* e duas companhias japonesas, *Hoya* e *Ohara*. É uma longa lista de parâmetros que caracteriza um bloco de vidro óptico - as mais importantes são o índice de refração, o coeficiente de dispersão, o fator de resistência ao ácido, a dureza, o coeficiente de transmissão, o grau de pureza (ou impureza por causa de inclusões e pequenas bolhas).

Os vidros que são caracterizados por certo conjuntos de parâmetros assim como certa faixa são chamados tipos de vidro - como os bem conhecidos “*flint glass*” e “*crown glass*”. A seguir uma lista dos tipos de vidros mais conhecidos, feitos, como mencionado anteriormente por um dos mais importantes produtores de vidro - *Schott* na Alemanha - e suas respectivas abreviações de acordo com a *Schott*. A denominação dos tipos de vidros das outras quatro empresas são similares à *Schott*- como por exemplo, NB- 7 (ou melhor N- BK7, que indica que este tipo de vidro é livre de arsênico e chumbo) tem a denominação geral “vidro 517642”.

Estes seis dígitos indicam o índice de refração n , e um comprimento de onda $\lambda_{(d)}=587,6\text{nm}$, para o qual $n_{(d)}$ é 1,517... (os primeiros três dígitos da designação) e para o qual a dispersão $v_{(d)}$ no mesmo comprimento de onda definido é 64,17... que arredondado é 64,2. Pode-se encontrar ao invés de 6 dígitos 9 dígitos como designação de um vidro – os três dígitos a mais são o primeiro dígito antes da vírgula e os dois dígitos depois da virgula da densidade – como 318 significa densidade de 3,18

Aqui um exemplo: N-BK7 (*Schott*) está listado em geral como vidro 517642.251 (com nove dígitos), que significa um índice de refração de 1,517 mais a dispersão 64,2 mais a densidade 2,51. A TABELA 1 mostra um comparativo das designações para o padrão de vidros ópticos, como exemplo o *Schott* BK7, e as designações de acordo com os outros quatro maiores:

TABELA 1: Exemplos de designações do tipo de vidro de acordo com o fabricante.

Fabricante	Vidro 517642
<i>Schott</i>	BK-7
<i>Corning</i>	B-16-64
<i>Pilkington</i>	BSC-517642

<i>Hoya</i>	BSC-7
<i>Ohara</i>	BSL-7 (517642)

Os nomes dos tipos de vidro listados na TABELA 2 são mais históricos do que puramente derivados de sua composição química - por boas razões, a maioria dos vidros conhecidos já haviam sido desenvolvidos no século XIX e no início do século XX. Este também foi o período de tempo, que a *Schott* na Alemanha (agora parte do grupo Zeiss) foi a líder na criação de novos tipos de vidros, por isso originalmente tinham nomes em alemão - como auxílio na TABELA 2 estão as traduções em inglês.

TABELA 2: Tipos de vidros e suas abreviações

Tipo de vidro	Símbolo (Abreviação)
<i>Fluorkron / FluorCrown</i>	FK
<i>Phosphatkron / Phosphate Crown</i>	PK
<i>Phospatschwerkron / Phosphate Dense Crown</i>	PSK
<i>Borkron / Borosilicate</i>	BK
<i>Kron / Crown</i>	K
<i>Zinkkron / Zinc Crown</i>	ZK
<i>Barileichtkron / Light Barium Crown</i>	BaKSubflint
<i>Schwerkron / Dense Crown</i>	SK
<i>Schwerstkron / Extra Dense Barium Crown</i>	SSK
<i>Lanthankron / Lanthanum Crown</i>	LaK
<i>Lanthanschwerkron / Dense Lanthanum</i>	LaSK
<i>Kurzflint / Antimony Flint</i>	KzF
<i>Kronflint / Crown Flint</i>	KF
<i>Barileichtflint / Light Barium Flint</i>	BaLF
<i>Doppelleichtflint / Extra Light Flint</i>	LLF
<i>Baritflint / Barium Flint</i>	BF
<i>Leichtflint / Light Flint</i>	LF
<i>Flint / Flint</i>	F
<i>Baritschwerflint / Dense Barium Flint</i>	BaSF
<i>Schwerflint / Dense Flint</i>	SF
<i>Tiefflint / Deepflint</i>	TF
<i>Lanthanflint / Lanthanum Flint</i>	LaF
<i>Lanthanschwerflint / Dense Lanthanum Flint</i>	LaSF

Todos estes tipos de vidros antigos e todos os novos tipos estão listados no “catálogo do vidro” no diagrama $nd-vd$ (FIGURA 3), onde o eixo x indica a dispersão v e o eixo y o índice de refração $n_{(d)}$. Este catálogo contém, além do já mencionado diagrama $x-y$, o índice de refração, número Abbe e propriedades químicas e físicas de vários tipos de vidros. Como a dispersão v e o índice de refração n dependem do comprimento de onda, os catálogos contém grupos para pelo menos a maioria dos comprimentos de onda na área dos espectros azul-verde-vermelho, mas usualmente muito mais, acima de 20 comprimentos de onda de 250 nm a 2500 nm (do *UV* ao *IR*).

Os ANEXOS 1, 2 e 3 são uma reprodução de uma página do catálogo óptico de *Schott*, que serão usadas para ilustrar os tipos de informação fornecidas pelos fabricantes de vidros para projetos ópticos e propósitos de engenharia. As propriedades ópticas de interesse mostradas aqui, índices refrativos (valores médios medidos para várias corridas) em 18 comprimentos de onda, números Abbe vd e ve , 12 valores de dispersão parciais, constantes para o índice versus a equação do comprimento de onda e valores médios de transmissividade interna de 10 e 25 mm de espessura do material e muitos comprimentos de onda entre 260 e 2500 nm.

As reproduções das tabelas a seguir mostram três diferentes tipos de vidros - um vidro óptico padrão, BK7 (ANEXO 1), e dois extremos - FK56 (ANEXO 2) num baixo extremo do índice de refração e outro, o SF66 (ANEXO 3) no extremo oposto. O BK7 pode ser considerado como um vidro óptico padrão.

Como se pode ver aqui, o índice de refração para este tipo de vidro são listados de UV a 248,3 nm até IR a 2325,4nm. A transmissividade interna é listada para dois valores de espessura, 10mm e 25mm para a mesma faixa de UV até IR. Também são importantes os valores da dispersão parcial e relativa e as constantes da fórmula de dispersão - o significado

destes valores serão explicados um pouco mais tarde. O FK56 é um vidro óptico especial com baixo índice de refração mas dispersão v significativamente altas, 94.95 comparada com 64.17 para BK7.

Comparando os valores do BK7 com FK56, pode-se ver diferenças na maioria das constantes e valores - não somente nos índices de refração. Na outra extremidade do diagrama x-y, onde se pode encontrar os tipos de vidros com índice de refração muito altos, o SF66 está posicionado – com um dos maiores índices de refração disponíveis $n=1,9228$, mas com uma dispersão muito baixa $v=20,88$.

FIGURA 1: Dependência dos danos a superfície em função do Índice de ductibilidade (LLE REVIEW, vol 73).

A FIGURA 1 mostra o variação dos danos causados à superfície de alguns tipos de vidro em função da propriedade mecânica de ductibilidade $(K_c/H_k)^2$. O BK7 está posicionado como o vidro de menor tendência a danos superficiais.

A dispersão pode ser explicada como a capacidade do vidro (e de outros materiais) de alterar a direção de um feixe de luz dependendo do comprimento de onda. Outra definição poderia explicar como uma consequência de um comprimento de onda dependendo do índice de refração.

o número *abbe*, do alemão "*Abbezahl*", escrito como "*n*" (em grego ν), o qual é usado nestas listas para quantificar a dispersão, é definido como mostra a equação 1:

$$\nu_{(d)} = \frac{(n_{(d)} - 1)}{(n_{(f)} - n_{(c)})} \quad (1)$$

Aqui os índices d , f e c são padronizados para certos comprimentos de onda – eles estão listados em cada folha anteriormente mostrada (NYMAN, 2005).

Outro parâmetro dispersivo de interesse, especialmente para projetistas de lentes, são as dispersões parciais, definidas pelas equações 2 e 3 mostradas a seguir:

$$P_{g,F} = \frac{N_g - N_F}{N_F - N_C} \quad (2)$$

Ou,

$$P_{C,s} = \frac{N_C - N_s}{N_F - N_C} \quad (3)$$

Valores para este e muitas quantidades similares são listadas para cada material em catálogos de vidros ópticos. Esta dispersão parcial indica como as propriedades refrativas dos

materiais mudam em uma pequena região espectral específica quando comparada às mudanças de uma região espectral maior (YODER,1986).

A diferença, dada pela equação 4 é também chamada dispersão principal (Δn) ou do alemão "*Hauptdispersion*",

$$\Delta_n = n_{(F)} - n_{(C)} \quad (4)$$

Onde:

$n_{(F)}$ = índice refrativo da linha azul do Cádmio (480 nm).

$n_{(C)}$ = índice refrativo da linha vermelha do Cádmio (644 nm).

Nos nossos dias, usualmente não o $v_{(d)}$, o qual é baseado na linha “d” do espectro , mas o $v_{(e)}$ o qual é baseado na linha “e” do espectro é usado para cálculos ópticos e assim conseqüentemente temos o valor de $v_{(e)}$ definido pela equação 5:

$$v(e) = \frac{[n(e) - 1]}{[n(F') - n(C')]} \quad (5)$$

Onde:

$n_{(e)}$ = índice refrativo da linha verde do Mercúrio (546 nm).

$n_{(F)}$ = índice refrativo da linha azul do Cádmio (480 nm).

$n_{(C)}$ = índice refrativo da linha vermelha do Cádmio (644 nm).

Não há uma grande diferença, mas suficiente para ser de importância para os cálculos ópticos – no caso do N-BK7, $v(e) = 63,96$ e $v(d) = 64,17$.

Sistemas ópticos precisam ser corrigidos não somente para um ou dois pares de comprimento de onda, mas em muitos casos no espectro visível inteiro – o que significa que mais pares de comprimento de onda precisam ser obtidos para calcular o coeficiente de dispersão resultante desses pares – chamada dispersão parcial relativa $P_{x,y}$, com x e y sendo um par de comprimentos de onda – como pode ser visto no ANEXO 1 para o N-BK7, temos 10 valores P – dispersão parcial relativa para vários pares de comprimentos de onda – listados. Para sistemas ópticos melhor corrigidos, sistemas para os quais o espectro secundário tem sido eliminado, assim como vidros com a dispersão parcial relativa anormal têm sido usado ΔP . Estes valores de ΔP (desvios da dispersão parcial relativa da linha normal) são listados (PARKER, in apud YODER, 1986).

Um caminho comum para descrever a curva do índice de refração versus o comprimento de onda é a fórmula de dispersão Sellmeier (equação 6), a qual é consideravelmente precisa para comprimentos de onda de 360nm até 1500nm se os três termos são usados como escrito abaixo:

$$n(\lambda)^2 - 1 = \frac{B_{(1)} \cdot \lambda^2}{(\lambda^2 - C_{(1)})} + \frac{B_{(2)} \cdot \lambda^2}{(\lambda^2 - C_{(2)})} + \frac{B_{(3)} \cdot \lambda^2}{(\lambda^2 - C_{(3)})} \quad (6)$$

onde B e C são coeficientes, os quais podem ser encontrados nas listas de dados de vidros, ou a fórmula de *Schott* (equação 7), que é mais ou menos o padrão para comprimentos de onda de 380nm até 750nm:

$$n(\lambda)^2 - 1 = A + A_{(1)}\lambda^2 + A_{(2)}\lambda^{-2} + A_{(3)}\lambda^{-4} + A_{(4)}\lambda^{-6} + A_{(5)}\lambda^{-8} \quad (7)$$

onde os valores de A são constantes da fórmula de dispersão empírica de *Schott*. A variável λ é expressa em micrômetros (NYMAN, 2005).

A equação 7 é normalmente usada para determinar o valor de N para vidros ópticos nos comprimentos de onda intermediários e outros do que os dados pelas medições ou obtidos na literatura. Isto não deve ser utilizado como uma extrapolação significativa dos dados fornecidos (Parker, in apud Yoder, 1986).

A FIGURA 2 mostra um exemplo de curva do índice de refração versus o comprimento de onda determinada pela equação de *Sellmeier*. *Para valores maiores de comprimento de onda os valores do índice de refração são menores.*

FIGURA 2: Curva do Índice de refração (n) x comprimento de onda (λ) – BK7. Com o aumento do comprimento de onda há redução nos valores do índice de refração

(WIKIPEDIA®, 2005).

Outro valor importante é a transmissividade interna. Este valor reflete de uma maneira quantitativa a capacidade do vidro de transmitir luz de diferentes comprimentos de onda. Os dados do vidro contém esta transmissividade $\tau(i)$ para comprimentos de onda de 2500 nm (*IR*) até o corte *UV*, dependendo do vidro, algum lugar abaixo de 400nm. No caso do N-BK7, este corte está em torno de 280nm (ANEXO 1). Para se ter uma idéia de como a espessura do vidro influencia a transmissividade, os dados são listados para duas diferentes espessuras – 10mm e 25mm (ANEXO 1). É bem conhecido, que o índice de refração muda com a temperatura – desta forma o coeficiente de temperatura dos índices de refração são listados. Os valores mencionados estão destacados no ANEXO 1.

Os vidros não somente mudam suas características físicas com a temperatura, também alteram significativamente suas características ópticas, o suficiente para se saber a respeito e se tomar precauções (NYMAN, 2005).

A variação do índice de refração com a temperatura, dn/dT , é positivo para muitas classes de vidros, mas negativa para alguns. Por exemplo, dn/dT para o vidro *Schott* BK7 é $3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{K}$ de 20 a 40°C, enquanto o valor para o vidro FK 56 é $-5,9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{K}$, como é mostrado nos ANEXOS 1 e 2. Note que estas mudanças em n incluem as alterações correspondentes do índice de refração do ar usado como referência. Valores de dn/dT para vidros ópticos em vários comprimentos de onda e faixas de temperatura podem não ser encontrados em catálogos de fabricantes como mostrado no ANEXO 3.

A FIGURA 3 é um “mapa do vidro” mostrando os vidros ópticos produzidos por um fabricante típico (Sumita Glass), cada símbolo representa um tipo específico de material. Os símbolos estão dentro de 23 grupos básicos que ocupam uma faixa específica de N_d versus vd , geralmente estas regiões encontram-se numa diagonal do canto inferior esquerdo ao canto

superior direito, indicando que vidros usuais existem somente próximos a esta diagonal. Abbe mostrou que estes vidros com propriedades “normais” de dispersão encontram-se ao longo de uma linha, conectando-se os pontos $N_d = 1.511$, $v_d = 60,5$ e $N_d = 1.620$, $v_d = 36,3$. A FIGURA 4 mostra um mapa do vidro em função de θ_g , $F - v_d$ (Dispersão parcial versus número *Abbe*)

SUMITA - VIDROS ÓPTICOS

FIGURA 3: Tipos de vidros – diagrama nd-ν d (Sumita optical glass,2002)

SUMITA - VIDROS ÓPTICOS

FIGURA 4: Tipos de vidros – Diagrama $\theta_{g,F}$ -ν d (Sumita optical glass,2002)

Vidros localizados fora dessa linha mostram dispersões anormais e são altamente desejáveis na correção do espectro secundário, uma forma de aberração cromática em sistemas ópticos refrativos.

Aproximadamente 20% de cerca de 240 tipos de vidros mostrados na FIGURA 3 seriam suficiente em 80% dos problemas de materiais de projeto dos projetistas de lentes contemporâneos, foram 51 tipos de vidros selecionados primeiramente (Walker, 1978). Requisitos excepcionais irão, naturalmente, demandar o uso de outros tipos de vidros (YODER, 1986).

Outros valores nas listas de dados dos vidros são coeficientes e indicadores que permitem conclusões considerando a resistência ao ácido, álcali, manchas, clima e ao fosfato que são importantes para se decidir quando se necessita de um tipo de vidro para uso como superfícies vítreas externas em um sistema óptico – como exemplo, seria imprudente usar como superfície frontal uma lente de câmera um vidro que é muito leve, sem resistência suficiente a ácidos e álcali e que não seja resistente, tais lentes frontais seriam destruídas em curto tempo, mas dentro de um sistema multi lentes consolidado tais tipos de vidros poderiam ser utilizados se necessário.

Existem muitos outros dados importantes e valores, que são usados e necessários para caracterizar completamente um vidro óptico – como a classe de bolhas, desvios locais do índice de refração, chamados estrias, a quantidade de inclusões e por último, mas não menos importante a birrefringência mostrada na FIGURA 5 (NYMAN, 2005).

Estes parâmetros não são listados nas páginas de catálogos individuais, mas apropriadamente nas especificações gerais para vários níveis de qualidade de materiais disponíveis para aquisição. Controles especiais nos processos de manufatura e / ou na seleção de materiais com propriedades específicas devem estar disponíveis a preços mais elevados (YODER, 1986).

FIGURA 5: Calcita, variedade de espato da Islândia, mostrando birrefringência (WINGE et al, 2001).

A birrefringência é uma propriedade ótica de minerais anisótropos transparentes, fazendo com que a radiação luminosa refratada seja dividida em dois feixes ortogonais de radiação polarizada que se propagam com velocidades diferentes dentro do corpo mineral. A diferença dos ângulos de refração entre os dois feixes luminosos, ou seja, com a dupla refração no mineral provoca dupla imagem de objetos vistos através do mineral.

2.2.2 Geração de inclusões em vidros ópticos

Em geral, sólidos são contaminantes grosseiros que devem ser evitados se possível, todavia algumas vezes tais contaminações não podem ser evitadas totalmente em todo o processo de fundição. Por exemplo, partículas de platina podem ser freqüentemente encontradas em vidros ópticos devido ao freqüente uso de platina como material das paredes dos tanques de fundição padrão. Tais partículas de platina são menores ($<0,03\text{mm}$ em geral)

e não mostram problemas em aplicações padrão, entretanto, elas devem vir a ser importantes em aplicações de laser de alta potência, por exemplo.

Inclusões (partículas sólidas) dentro de vidros podem ser geradas por:

- Resíduos dentro da mistura que podem não ter se fundido completamente;
- Material das paredes do recipiente com baixa solubilidade;
- Partículas externas;
- Partículas de platina do tanque;
- Processo de devitrificação, cristalização.

A FIGURA 6 mostra microbolhas geradas em um bloco de vidro N-BK7.

FIGURA 6: Bolhas geradas pelo reaquecimento pressurizado do N-BK7 (*SCHOTT OPTICAL GLASS, 2005*).

É evidente que quanto menos microbolhas forem encontradas em um bloco de vidro, melhor, quanto mais homogêneo o índice de refração que está no interior do bloco de vidro melhor, etc. Como não é possível se produzir vidro o qual esteja 100 % livre de todas estas

deficiências, sua quantidade, tamanho e densidade definem a qualidade de um vidro óptico. Para propósitos fotográficos, pequenas bolhas ou inclusões são usualmente sem importância para a qualidade fotográfica enquanto que estrias são de importância – apenas como exemplo. Isto também depende da localização dentro do caminho óptico, cuja deficiência é mais importante considerar ou não – estrias próximas ao campo plano não são tão ruins como em uma lente próxima ao plano de abertura, enquanto bolhas e inclusões em vidro o qual está próximo ao campo plano é muito pior do que a mesma quantidade em lentes próximas ao plano de abertura.

Se um sistema óptico precisa ser corrigido o mais próximo da perfeição possível, os projetistas gostam de adicionar elementos, que não são provenientes do vidro, mas de um cristal inorgânico – usualmente Fluoreto de Cálcio. O CaF_2 tem propriedades ópticas atraentes – alta transmissividade desde o baixo UV até o IR (135nm a 9400nm) e uma dispersão muito baixa – isto significa que um sistema óptico pode ser trazido a “absoluta” perfeição considerando a correção de cores usando um ou mais elementos deste cristal, em nossos dias todos esses cristais crescem artificialmente, não sendo mais de origem natural. O CaF_2 é leve e caro – o que torna necessário implementar lentes como elementos bem protegidos dentro do sistema óptico. (NYMAN, 2005)

2.3 LENTES

2.3.1 Esféricas

Os tipos mais comuns de lentes encontradas são as lentes esféricas, estas são formadas pela curvatura da superfície de uma esfera. Cada lado da lente pode ter uma saliência, denominada convexa ou uma depressão, denominada côncava. As lentes convexas em ambas as superfícies são denominadas biconvexas (FIGURA 7) e analogamente as lentes com ambas as superfícies côncavas são denominadas bicôncavas (FIGURA 8). As lentes podem ainda ter uma superfície côncava e a outra convexa, sendo denominadas cômvaso – convexas, caso as curvaturas sejam iguais são denominadas lentes Meniscus, em alguns casos qualquer lente cômvaso – convexa independentemente da curvatura pode ser denominada lente Meniscus.

FIGURA 7: Representação esquemática e visualização de um feixe de laser atravessando uma lente biconvexa (WIKIPEDIA, 2005).

FIGURA 8: Representação esquemática e visualização de um feixe de laser atravessando uma lente bicôncava (WIKIPEDIA, 2005).

2.3.2 Anesféricas

Lente anesférica é por definição uma superfície de lente que não é parte de uma esfera na secção transversal, tem uma curvatura que muda continuamente na direção do diâmetro da lente como mostrado na FIGURA 9, são usadas por projetistas de lentes para minimizar certos tipos de aberrações, particularmente aberrações esféricas, algumas vezes indicadas por ASPH ou AL. A primeira lente anesférica foi projetada em 1901 por Karl Zeiss.

Existem basicamente dois tipos de lentes anesféricas – replicadas e retificadas. Lentes anesféricas replicadas são prensadas em um molde e são destinadas a aplicações onde é requerida uma menor qualidade e um custo menor. Lentes replicadas são normalmente utilizadas em aplicações mais baratas de lentes zoom e câmeras fotográficas. Por outro lado lentes retificadas são formadas precisamente por um processo de retífica o que faz com que sejam extremamente caras. A FIGURA 9 mostra uma representação esquemática das diferenças entre as lentes esféricas e anesféricas.

FIGURA 9: diferenças entre lentes esféricas e lentes anesféricas – em lentes anesféricas, a mudança contínua de curvatura na direção do diâmetro da lente concentra a luz em um único ponto (CANON TECHNOLOGY, 2005).

2.3.3 Métodos de obtenção de lentes

Existem vários métodos para a obtenção de lentes, os aspectos econômicos relativos a cada processo de obtenção já foram citados anteriormente apenas como orientação macro a respeito, ou seja, os processos menos precisos e, portanto mais baratos, são destinados a aplicações mais simples e os processos mais precisos são requeridos onde elevado grau de qualidade são necessários. As explicações a seguir visam tão somente dar uma breve idéia de cada processo como referência comparativa ao processo de retificação.

2.3.3.1 Método de moldagem plástica

Um frágil molde esférico de metal é preenchido com plástico para formar a lente, para obtenção de resultados satisfatórios foram desenvolvidas uma variedade de inovações para assegurar uma formação muito precisa e estável. Este método é utilizado nas lentes anesféricas de câmeras compactas e contribui para a redução de custos das câmeras (CANON TECHNOLOGY, 2005).

2.3.3.2 Método da moldagem de vidro

Este método incorpora o processamento de alta precisão de um molde anesférico, dentro do qual o vidro é diretamente prensado. Isto evidencia uma grande dificuldade para se manter um alto nível de precisão sob as altas temperaturas em que o vidro se funde. Foram analisados vidros e materiais para moldes e depois de numerosas simulações de temperatura e mudanças dimensionais, conseguiu-se criar um molde (FIGURA 10-b) que permanece estável a altas temperaturas (precisão de forma menor do que $0,3\mu\text{m}$; rugosidade superficial: $0,02\mu\text{m}$) (CANON TECHNOLOGY, 2005).

FIGURA 10: (a) lentes de vidro obtidas por moldagem, (b) molde para obtenção de lentes.

Para evitar a oxidação durante o processo de moldagem, foi desenvolvido um equipamento que desempenha funções de aquecimento, pressurização, formação e resfriamento em nitrogênio. A produção de lentes usando a tecnologia de moldagem de vidro oferece um alto grau de flexibilidade em termos de índice de refração e outros fatores, estas lentes são apropriadas para o uso em inúmeros sistemas ópticos (CANON TECHNOLOGY, 2005).

2.3.3.3 Método de Fotoreplicação

Este método envolve a cobertura de uma lente anesférica com resina endurecida sob o efeito de luz ultravioleta para criar uma superfície anesférica. Tem-se estudado exaustivamente as propriedades das resinas e materiais e para produção de lentes anesféricas de grandes diâmetros (CANON TECHNOLOGY, 2005).

2.4 ÓPTICA

2.4.1 Aberrações

Os principais defeitos ou aberrações dos sistemas ópticos são as aberrações cromáticas ou franjas coloridas ao redor das imagens que aparecem porque luzes de diferentes cores são focadas em diferentes pontos por uma lente, causando uma imagem borrada. Aberrações esféricas aparecem porque a luz que passa através do centro da lente é focada num ponto

diferente de uma luz que passa através da borda da lente. Astigmatismo por sua vez aparece se a lente tem uma curvatura diferente na posição vertical e horizontal. Enquanto o *coma* (do latim cometa por se parecer com a cauda do objeto celeste) aparece porque a luz que passa diretamente através da lente está focada em um ponto diferente da luz entrando na lente por um determinado ângulo (TISCALI, 2005).

Genericamente, aberrações são erros que ocorrem na imagem resultante que não está de acordo quando comparada a imagem real. Qualquer projeto de sistema óptico está sujeito a aberrações ópticas, este fenômeno é causado pela natureza da luz e por vários parâmetros como índice de refração, número Abbe, densidade e coeficiente de dilatação dos vidros ópticos que variam com a densidade, comprimento de onda, temperatura, ângulo de incidência do feixe de luz. Uma aberração depende assim de parâmetros ou constantes e variáveis. Em várias intensidades todas essas entradas devem produzir as já conhecidas aberrações cromáticas, *coma*, esféricas, astigmatismo, campo de curvatura e distorções geométricas (KENNETH, 2005).

Quando todos os raios de um objeto puntiforme não estão focalizados num único ponto-imagem, a ausência de nitidez da imagem é uma aberração. As aberrações não são consequências de qualquer defeito da lente, ou do espelho, mas apenas o resultado da aplicação das leis da refração e da reflexão às superfícies esféricas. Não aparecem explicitamente nas equações simples, pois são usadas as aproximações de pequenos ângulos nas deduções das fórmulas. Algumas aberrações podem ser eliminadas, ou parcialmente corrigidas, mediante superfícies anesféricas nos espelhos ou lentes. Estas superfícies, no entanto, são mais difíceis de lapidar. Um exemplo típico de superfície refletora anesférica é o espelho parabólico (INSTITUTO DE FÍSICA UFRG, 2005).

Alguns exemplos de aberrações de raios que se afastam da aproximação paraxial são mostrados na FIGURA 11.

FIGURA 11: Alguns tipos de aberrações ópticas (TISCALI, 2005).

2.4.1.1 Aberração Cromática

Resulta do efeito de dispersão, onde ocorre a variação do índice de refração com o comprimento de onda. A distância focal de uma lente depende de seu índice de refração e é, portanto, diferente em diferentes comprimentos de onda. Este tipo de aberração refere-se apenas a lentes, conhecida como espectro secundário. Sob iluminação policromática, o número de Abbe que expressa a relação entre a dispersão e o índice de refração do vidro, define a dispersão do comprimento de onda. Quando diferentes comprimentos de onda do espectro visível não foca exatamente no mesmo plano focal, as aberrações cromáticas ocorrem (FIGURA 12). Suas intensidades dependem da dispersão do vidro, elas ocorrem porque o índice de refração é uma função do comprimento de onda da luz, como um prisma. A luz azul tem uma refração maior do que a vermelha produzindo franjas ou cores falsas ao redor do objeto, principalmente imagens púrpuras ou amarelas. Esta aberração cromática pode ser removida utilizando-se a combinação apropriada de vidros de diferentes índices de refração (KENNETH, 2005).

FIGURA 12: (a) Dispersão de um espectro visível em uma lente.(b) correção da aberração cromática com a utilização de um par de lentes (KENNETH et al, 2005).

2.4.1.2 Astigmatismo

Os raios afastados do eixo da lente (FIGURA 13) que passam ao longo do eixo AB são focados em S , enquanto que os raios que se originam do mesmo ponto objeto, mas que passam através do eixo CD são focados em T , originando, portanto, uma imagem completamente fora de foco.

FIGURA 13: Representação esquemática do astigmatismo (KENNETH, 2005).

O astigmatismo é similar ao *coma*, mas surge em pequenos objetos na borda do campo atingindo uma lente subcorrigida assimetricamente. Não é sensível a fenda, os raios que chegam passam através da lente num ângulo obliquo em relação ao do eixo óptico diferentemente dos paraxiais. Dependendo do ângulo de incidência do eixo de raios entrando na lente, o plano refletido é orientado tangencialmente ou dividido em dois planos FIGURA 14. Então o resultado da imagem depende da localização do plano focal e assim produz imagens borradas mais ou menos alongadas cuja intensidade e contraste diminuem com o aumento da distância do centro (FIGURAS 15 e 16). Quando um sistema óptico é corrigido para o astigmatismo, as imagens tangenciais e sagitais coincidem na superfície de curvatura da lente também chamada de superfície Petzval (KENNETH, 2005).

FIGURA 14: Vista lateral e disco aerado de uma estrela brilhante entrando a 25° mostrando astigmatismo. As linhas tangenciais e sagitais da imagem não coincidem na área de menor distorção e nesse caso mostra a forma de uma cruz (KENNETH, 2005).

FIGURA 15 :Astigmatismo de $\frac{1}{4}$ onda em um telescópio desobstruído (KENNETH, 2005).

FIGURA 16 a imagem à esquerda foi gerada por um refrator perfeito de 6" e a imagem à direita do mesmo telescópio com onda 0,5 de astigmatismo (x/y) (KENNETH, 2005).

2.4.1.3 Aberração esférica

Os raios que atingem a lente em pontos afastados do eixo são muito mais refratados que aqueles que atingem a lente nas vizinhanças do eixo, o que faz com que nem todos os raios sejam focalizados num único ponto (FIGURA 11-c e FIGURA 17). A imagem parece ser a de um disco circular, com diâmetro determinado pelos raios refratados na borda mais externa da lente (FIGURA 18). Quando vemos um feixe de luz passando através de uma lente, é fácil entender que o plano focal depende da distância do eixo óptico. Usualmente uma superfície óptica é uma secção de uma esfera visto que é a forma mais fácil de se fazer. Mas com uma superfície esférica, lentes ou espelhos, recebendo raios de diferentes alturas em relação ao eixo não desviam na mesma posição e foca em pequenas diferentes posições ao longo do eixo. Então se o centro da imagem fica no foco um brilho, o contorno do campo aparece borrado e opaco. Este efeito é chamado de aberração esférica. O fator para tomar em consideração é referido como o desvio da lente.

FIGURA 17: Representação esquemática da aberração esférica (KENNETH, 2005).

Aberrações esféricas dependem da distância focal, da fenda, forma e da distância entre o objeto e o eixo. Tipicamente, uma lente positiva simples é sub corrigida para aberrações

esféricas, o resultado é óbvio, os raios mais distantes focam mais próximos da lente do que os paraxiais (KENNETH, 2005).

FIGURA 18: Imagem de uma estrela com aberração esférica (KENNETH, 2005).

2.4.1.4 *Coma*

É produzido quando os raios de um ponto fora do eixo da lente passam através do perímetro da lente e são focados num anel deslocado radialmente do foco dos raios que passam no centro da lente. A imagem que se observa tem a forma da cauda de um cometa (FIGURA 19).

FIGURA 19: representação esquemática do *coma* (KENNETH, 2005).

Aberração *coma* que significa “cometa” em latim é similar à aberração esférica, Quando se projeta o raio solar através de uma lente pode-se notar a existência desta aberração, inicialmente a imagem do Sol tem a forma circular, mas quando a posição da lente se altera em relação aos raios que a atravessam a imagem resultante tem uma forma alongada, como um cometa.

Esta aberração depende da forma da lente. Os raios que chegam através da periferia da lente focam mais perto do eixo e produz um ponto borrado maior do que os raios paraxiais. Como esta aberração é proporcional à distância do eixo central, quanto mais os raios são distantes do centro mais o ponto focal muda de posição e forma uma imagem borrada, principalmente fora do eixo (FIGURAS 20 e 21).

FIGURA 20: Imagem de um aberração *coma* (KENNETH, 2005).

FIGURA 21: As imagens acima mostram uma aberração *coma* no eixo X de $\frac{1}{4}$ de onda para um telescópio desobstruído (KENNETH, 2005).

2.4.1.5 Curvatura de campo

É produzido quando raios oblíquos se focam num ponto mais próximo da lente do que os raios que passam pelo eixo da lente (FIGURA 22).

FIGURA 22: Curvatura de campo. Principalmente mais visível nas bordas do campo
(KENNETH, 2005).

2.4.1.6 Distorção

Ocorre quando a ampliação da imagem depende do tamanho do ângulo incidente dos raios que passam pela lente. Neste caso observa-se que linhas retas parecem curvas na imagem FIGURA 23.

FIGURA 23: Uma imagem (a) livre de distorção, (b) com a chamada “Barril” e (c) com a chamada “Almofada de Alfinetes” (KENNETH, 2005).

2.4.1.7 Rugosidade

Este tipo de aberração é associada principalmente a espelhos, uma vez que na retífica de espelhos maior ou menor grau de rugosidade pode estar presente. FIGURA 24: À primeira vista estas imagens se parecem muito, entretanto depois da subtração das imagens podemos ver na FIGURA 24 (c) que certas áreas mudaram mais do que outras. Pequenas quantidades de rugosidade não são problemáticas devido a lisura dessa aberração sobre a superfície do espelho.

FIGURA 24: (a) Imagem de Saturno com aberração de 5'', 30% obstruída, (b) O mesmo telescópio mas com 1/20 de rugosidade adicionado.e (c) a subtração das imagens (a) e (b)

(KENNETH, 2005).

2.5 REBOLO DIAMANTADO

2.5.1 Materiais abrasivos

Existem vários tipos de rebolos no mercado, variando sua forma, tamanho, grana e material abrasivo, sendo cada qual selecionado conforme a aplicação e grau de acabamento desejado na superfície. Será tratado brevemente alguns deles e suas aplicações, posteriormente dos rebolos diamantados metálicos e dos rebolos diamantados em resina.

2.5.1.1 Diamante

Tipicamente utilizado em materiais de alta dureza como o Carbetto de Tungstênio. Discos diamantados podem assegurar uma alta taxa de remoção de material e um fino acabamento, dependendo do tipo de disco e grana utilizada assim como dos parâmetros de processo.

2.5.1.2 Nitreto de Boro Cúbico (Cubic Boron Nitride CBN)

Tipicamente utilizado para lapidar metais ferrosos, incluindo ferro fundido, ligas ferrosas, aços ferramenta e ocasionalmente cerâmicas.

2.5.1.3 Oxido de Alumínio

Geralmente utilizado para lapidar, retificar e polir superfícies de baixa rugosidade, tipicamente usado para materiais de alta tensão de alongamento, engrenagens endurecidas, pistas de rolamentos e operações em que pode se exercer pressão para quebrar os cristais.

2.5.1.4 Carbetto de Silício

Utilizado para remoção de materiais de dúcteis a materiais duros, tipicamente usado nas operações de lapidação e retífica, engrenagens forjadas ou endurecidas, válvulas, trabalhos de ferramentaria e manutenção geral onde polimento não seja essencial.

2.5.1.5 Carbetto de Boro

Utilizado em cerâmica, carbetto e outros materiais duros.

2.5.1.6 Alumina Calcinada

Para uso em metais, aplicações ópticas , wafers de silício e outros materiais semi condutores. (UKAM INDUSTRIAL SUPER HARD TOLLS, 2006).

A FIGURA 25 mostra a variação de dureza *Knoop* para alguns tipos de abrasivos e sua resistência à temperatura em °C. O diamante apresenta elevada dureza, entretanto sua dureza varia em função da temperatura de forma mais significativa que outros materiais, em relação ao CBN, por exemplo, o diamante passa a apresentar dureza menor a partir de 700°C. Em

função dessa característica o desempenho de rebolos de diamante pode ficar comprometido em baixas rotações uma vez que a temperatura pode ser elevada acima de níveis aceitáveis.

FIGURA 25: Dureza (K 100) e resistência à temperatura (°C) de materiais abrasivos (LMP König apud. Zeilmann,2004).

2.5.2 Tamanho e distribuição do diamante

O tamanho e distribuição, ou seja, a concentração de diamante do rebolo representa um importante papel na superfície obtida por polimento, retificação e lapidação. O tamanho do diamante é diretamente proporcional à remoção de material e a rugosidade obtida. Partícula de diamante maior tem uma maior taxa de remoção de material e por outro lado partículas menores resultam em uma menor taxa de remoção, entretanto com um melhor acabamento da superfície.

Outro fator importante que afeta as características do polimento, retífica e lapidação é a concentração de diamante usada, ou seja, o número de partículas de diamante em contato com a superfície trabalhada. Mudanças na concentração de diamante irão afetar a distribuição

de carga, dessa forma aumentando o número de partículas, a carga por partícula diminui devido ao maior número de pontos de contato. Assim, quanto menores forem as partículas e maiores as quantidades, o acabamento obtido será melhor com menores taxas de remoção de material. Nesse experimento foram utilizados rebolos resinóides com partículas de diamante (UKAM INDUSTRIAL SUPER HARD TOLLS, 2006).

2.5.3 Desgaste e afiação do rebolo

O desgaste do rebolo de diamante pode ocorrer de três formas, pelo desgaste natural em função do atrito, pelo rompimento do ligante ou pelo rompimento do grão de diamante (MALKIN, 1989). Com a ocorrência do desgaste do grão ocorre também o aumento das áreas achatadas em função do atrito contra a peça, alguns autores podem tratar como perda de afiação (OLIVEIRA in apud ALMEIDA, 2002). O rompimento do ligante pode ser provocado por erosão ou desprendimento do grão devido ao atrito entre o cavaco e o ligante. A fratura do grão ocorre pela remoção de fragmentos abrasivos dentro de um grão (FIGURA 26). O uso de materiais cerâmicos e vidro óptico BK 7 tornam o desgaste do rebolo mais acentuado por suas características naturais de alta dureza e fragilidade.

FIGURA 26 :Mecanismo de desgaste do rebolo (MALKIN,1989)

Para manter as características de corte do rebolo se torna necessária sua afiação, chamada dressagem. A operação de dressagem se caracteriza basicamente pela remoção de material ligante a fim de tornar o grão aparente, de forma a ter contato novamente com a peça a ser retificada, uma vez que o papel do ligante é tão somente ancorar o grão abrasivo. A perda de desempenho se traduz em perda de qualidade no acabamento superficial e redução nas taxas de remoção, dessa forma a operação de dressagem, assim como os parâmetros de corte, seleção adequada do rebolo e equipamento com a rigidez e precisão compatíveis se tornam fatores decisivos para obtenção de superfícies com alto grau de acabamento e processos de fabricação economicamente viáveis.

Nesse contexto tem se tornado uma necessidade o desenvolvimento de processos de dressagem que reduzam o desperdício de tempo durante a operação e reduza ou até elimine paradas indesejadas para a afiação do rebolo. Estes fatores influenciam fortemente o resultado dos trabalhos, por um lado pela perda de tempo já mencionado, por outro lado pela perda de parâmetros, ou seja, o material retirado do rebolo durante a dressagem deve ser levado em consideração para continuidade da operação de retífica. Numa operação de precisão

nanométrica a perda de material na ferramenta de corte, nesse caso o rebolo, faz com que o avanço selecionado seja comprometido se não houver uma compensação adequada da quantidade de material removido do rebolo.

Atualmente o processo de dressagem mais encontrado para sanar esta deficiência é o ELID (*Electrolytic In-process Dressing*) (FIGURA 27), que permite a dressagem do rebolo durante a operação de usinagem, eliminando o desperdício de tempo. Nesse caso um rebolo de diamante com ligante metálico deve ser utilizado de forma a garantir a passagem de corrente elétrica, premissa para a remoção de material onde o rebolo se comporta como um eletrodo (KISTLER B. et al, 2004).

FIGURA 27: Representação esquemática do ELID (Murata et al in apud Rahman et al, 2003)

2.5.4 Especificação do Rebolo

Os rebolos são especificados de acordo com as normas DIN 69111 e ANSI, sendo esta última mais utilizada pelos maiores fabricantes de rebolos do mundo. Para especificação de

um rebolo foram criadas seqüências de letras e números que caracterizam os materiais utilizados, tamanho do grão, dureza, concentração, tipo de ligante etc. Na FIGURA 28 um exemplo de especificação de rebolo.

	Prefixo	1	2	3	4	5	6	7	8
Seqüência		Tipo de Abrasivo	Tamanho do grão abrasivo	Grau	Concentração	Tipo de Ligante	Modificação do ligante	Profundidade do abrasivo	Registro dos produtos
	<u>M</u>	<u>D</u>	<u>120</u>	<u>N</u>	<u>100</u>	<u>B</u>	<u>77</u>	<u>1/8</u>	<u>---</u>
	Simbolo dos produtos indicando o tipo de abrasivo (opcional)	Diamante -D CBN - B			Designação do produtor, pode ser número ou símbolo	B Resina M Metal V Vitri- ficado	Notação dos produtos de um tipo especial de ligante ou modificação	Profundidade de trabalho do grão em polegadas ou mm	Simbolo de identificação dos produtos

Grossoiro a muito fino:			
8	30	90	280
10	36	100	320
12	46	<u>120</u>	400
14	54	150	500
16	60	180	600
20	70	220	etc
24	80	240	

Dureza	
A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z	
mole.....	duro

FIGURA 28: Exemplo de especificação de rebolos abrasivos conforme ANSI

(MALKIN,1989).

2.6 FATORES DE INFLUÊNCIA NO ACABAMENTO FINAL

2.6.1 Geração e propagação de trincas

A usinagem de materiais frágeis requer cuidados especiais, principalmente quando se trata de vidros para aplicações ópticas. Primeiramente o vidro não apresenta uma estrutura homogênea sua estrutura é amorfa (FIGURA 29 (a)) o que contribui para o surgimento de trincas, tornando crítico o processo de retífica.

FIGURA 29: Estrutura do vidro e do cristal (SINHOF, 1996).

A composição do vidro é fator de grande importância na geração de trincas e sua propagação durante a usinagem. Os tipos de vidros utilizados são cuidadosamente selecionados pelos projetistas ópticos uma vez que influenciam de forma significativa no resultado final e apresentam diferentes resultados para as mesmas condições de usinagem. Por se tratar de um material frágil as trincas merecem atenção especial e a geração de trincas tem sido objeto de estudo para melhor entendimento de seu mecanismo.

A FIGURA 30 mostra o comportamento da propagação da trinca para materiais de diferentes composições (O-Si e O-Si-Ca). Esse tipo de comportamento requer não somente uma seleção de acordo com a aplicação, mas também uma avaliação dos parâmetros de usinagem.

FIGURA 30: Propagação de trincas em diferentes materiais (SINHOFF, 1996).

Os grãos de diamante do rebolo penetram o vidro como resultado das forças normal e tangencial presentes (FIGURA 31). As interações de forças durante o processo de retífica irão determinar o avanço a ser adotado de forma a minimizar a profundidade da trinca e, portanto minimizar também o número de passes para obtenção do produto final.

FIGURA 31 Profundidade da trinca causada pela penetração do grão (SINHOF,1996).

FIGURA 32: Estágios de formação da trinca. (SINHOF,1996).

A FIGURA 32 mostra os estágios de formação da trinca em função das forças exercidas durante a retificação, o surgimento dessa trincas pode não ter sido causado pelo próprio processo de usinagem, mas também pelo processo de fabricação do vidro. O fato de ocorrer o fechamento da trinca no último estágio não significa, entretanto, que ela não exista mais. A figura 33 ilustra o modelo de remoção de material no regime frágil e dúctil. A energia necessária para se remover o material segundo BIFANO, et al. (1987;1991) torna –se maior do que a energia necessária para o surgimento de trinca, caracterizando o regime dúctil.

FIGURA 33: Formação de fratura. (a) Energia para formação de fratura (E_f) é maior do que a energia de escoamento plástico (E_p); (b) Energia para formação de fratura (E_f) é menor do que a energia de escoamento plástico (E_p); (b) (BIFANO in apud SINHOFF, 1996)

2.6.2 Espessura crítica

Além do tamanho dos grãos outro fator que influencia o acabamento na retificação de materiais frágeis é a espessura do material removido, ou seja, a espessura do cavaco. Pesquisas prévias sugerem que as fraturas podem ser evitadas ou minimizadas se a força normal por grão é mantida abaixo de do nível crítico (SINHOFF, 1996).

A carga crítica que resulta em trincas localizadas, corresponde a espessura crítica do cavaco, assim sendo se a força por grão é reduzida, a espessura crítica do cavaco é reduzida. Em condições em que a espessura máxima do cavaco é menor do que a espessura crítica, a deformação plástica predomina, caracterizando o regime dúctil de remoção de material. O

volume de material removido por grão tem sido utilizado quando se considera o regime dúctil na retificação de materiais frágeis. Isto é baseado na observação de que a deformação plástica predomina nos materiais frágeis quando o volume de material retirado da peça é muito pequeno (X. SUN et al, 2006).

O modelo de espessura crítica de BIFANO usa um mecanismo de fratura aproximado e é desenvolvido de estudos de indentação juntamente com dados de estudos gerados em ensaios de retificação com diamante. A espessura crítica de penetração para iniciar uma fratura é dada pela equação 8:

$$d_c = \Psi \left[\frac{E}{H} \right] \left[\frac{K_c}{H} \right]^2 \quad (8)$$

ONDE:

d_c = profundidade de penetração crítica para início da fratura

Ψ = constante adimensional dependente da geometria do indentador

E = módulo de Young

Os resultados de materiais dúcteis tem sido usados para retificação de vidros para calcular o valor de Ψ correlacionando os valores medidos para o cálculo da profundidade crítica citada na equação 8. O ponto de transição para a fratura frágil pode ser arbitrariamente definida como uma superfície que apresente 10% de fraturas e 90% de aparente remoção dúctil durante a retificação. A espessura crítica é expressa pela equação 9.(STEPHENSON, 2006)

$$d_c = 0,15 \left[\frac{E}{H} \right] \left[\frac{K_c}{H} \right]^2 \quad (9)$$

A profundidade crítica depende do material a ser retificado, para o BK& é calculada 42 nm baseado nas propriedades comumente usadas: $E = 81 \text{ GP}_a$, $K_c = 0,82 \text{ GP}_a \text{m}^{0,5}$ e $H_v = 5,8 \text{ GP}_a$ (X. SUN et al, 2006).

Durante os experimentos foi adotada a profundidade fixa de 20nm, de forma a garantir que esta variável não influenciasse nos resultados.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA DOS ENSAIOS

3.1 Planejamento Experimental

Durante os ensaios foram alteradas as velocidades do rebolo (V_s) e o avanço (f), a variação desses parâmetros tem por finalidade a experimentação de diferentes modos de remoção de material (dúctil e frágil) e a posterior comparação de resultados entre eles.

TABELA 3: Parâmetros de usinagem

Velocidade do rebolo V_s (rpm)	580	1480	6000	9400
Velocidade da Peça V_w (rpm)	2400	2400	2400	2400
Avanço f (mm/rev)	10^{-4}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-5}

Nos experimentos foi utilizado um rebolo de acabamento, uma vez que o objetivo é a análise da formação e propagação de trincas durante o processo de retificação e conseqüentemente os níveis de rugosidade e acabamento superficial que podem ser atingidos. A utilização de rebolos de desbaste e posteriormente de acabamento trariam informações relevantes a respeito da propagação e formação de trincas nessas condições, mas sobretudo quantos passes seriam necessários para atingir o acabamento desejado com o rebolo de acabamento, trazendo assim uma visão técnica e também econômica de todo o processo de obtenção de uma lente.

3.2 Retífica ASG 2500

O equipamento utilizado no experimento foi um torno de alta precisão ASG 2500 (*Aspheric Surface Generator*) RANK PNEUMO (RANK TAYLOR HOBSON) capaz de garantir uma precisão de 10 nm graças aos mancais aerostáticos de rotação do eixo árvore e do eixo do rebole diamantado, o que garante a rigidez axial e radial do conjunto, entre outros fatores. A estrutura é composta por uma base em ferro fundido aliviada de tensões e estrutura de aço soldada. O CNC (Comando Numérico Computadorizado) do equipamento utilizado é um ALLEN BRADLEY 8200 que controla os movimentos dos eixos X e Z simultaneamente. O posicionamento é verificado por transdutores interferométricos a laser de fabricação da HEWLETT-PACKARD, em loop com o controlador. Para garantir o funcionamento e exatidão do sistema eletrônico o equipamento está instalado em uma sala semi-limpa com controle de temperatura e umidade relativa máxima de 55% (FIGURA 34).

FIGURA 34: ASG 2500 (*Aspheric Surface Generator*) Rank Pneumo (Rank Taylor Hobson). Sem o cabeçote retificador

A placa de fixação é ranhurada e fixa a peça por vácuo (70 kPa) e pode ser regulada conforme a necessidade (FIGURA 35). O cabeçote retificador (FIGURA 36) é montado sobre a base e pode atingir até 10000 rpm, com estrutura de ferro fundido que elimina vibrações indesejadas no processo de retificação e garante a integridade do eixo –árvore (FIGURA 37). O sistema de lubrificação conta com controle de temperatura e pressão do fluido, nesse experimento foi utilizado o Etileno Glicol misturado à água na proporção 1:10.

FIGURA 35: Placa ranhurada para fixação do suporte de alumínio

FIGURA 36: Cabeçote retificador.

FIGURA 37: Detalhe Eixo árvore e peça a ser retificada.

3.3 Preparação da amostra de vidro

Existe uma vasta gama de vidros ópticos disponíveis no mercado, variando suas características como mencionado anteriormente. Nesse experimento foi adotado o vidro óptico BK7 (TABELA 4), por ser um material de fácil usinabilidade e representar um modelo de propagação de trincas e condições de corte que pode ser extrapolado para outros tipos de vidro. O BK7 é considerado um vidro óptico padrão (CAPÍTULO 2).

TABELA 4: Propriedades da amostra BK7

Propriedades	Valor
Ponto de Fusão	1250° C
Densidade (20° C)	2,51 g/cm ³
Dureza Knoop (carga 100g)	520 Kg/mm ²
Módulo de Young (E)	8,1 x 10 ¹⁰
Módulo de ruptura (psi)	2400

3.3.1 Montagem da amostra

- a) Para assegurar a boa adesão da amostra à placa suporte, foi efetuada inicialmente sua limpeza com tricloroetileno (99,5% de álcool);

- b) A amostra foi colada com cera odontológica no suporte de alumínio, para tanto foi utilizado um aquecedor (Fisatom modelo 501) à temperatura aproximada de 100°C (FIGURA 38). O suporte metálico foi colocado sobre o aquecedor até estabilizar a temperatura;

FIGURA 38: Aquecedor elétrico Fisatom

- c) Após a estabilização da temperatura foi depositada a cera na superfície do suporte de alumínio;
- d) Após a cera se apresentar fundida, a amostra de vidro foi posicionada sobre o suporte (FIGURA 39) e pressionada a fim de reduzir o batimento axial (FIGURA 40);
- e) O aquecedor foi desligado e o conjunto foi deixado em repouso até esfriar.

FIGURA 39: Amostra fixada sobre suporte de alumínio

FIGURA 40 Detalhe da preparação de uma amostra. Verificação de batimento radial e axial

Após a usinagem a amostra foi submetida a um banho em tricloroetoleno no ultra som (FIGURA 41) durante 1 hora.

FIGURA 41: Ultra som JULABO USR 1 (35 kHz, 60W).

3.4 Ferramenta de corte (rebolo)

A qualidade do rebolo e sua correta seleção vão definir a qualidade do acabamento superficial, uma vez atendidas outras premissas como a seleção do tipo de vidro, preparação da amostra, equipamento de usinagem com precisão e rigidez necessários.

O rebolo diamantado utilizado foi um SD800L50B-1/8 da PARSONS DIAMOND (ver sistema de especificação de abrasivos no item 2.5.4), suas características são listadas na TABELA 5.

TABELA 5 Características geométricas do rebolo de diamante

Ferramenta SD800L50-1/8	
Diâmetro (mm)	75
Espessura (mm)	3
Tipo de abrasivo	“D” - Diamante
Tamanho do grão abrasivo	“800” – Muito fino
Grau	“L” – Dureza média
Profundidade do grão abrasivo (polegadas)	1/8

3.5 Análise do acabamento Superficial : Interferometria de Escaneamento e Microscopia Óptica

Tratando-se de retífica em vidro o processo de medição requer atenção especial, por se tratar de uma operação de precisão nanométrica os meios de medição devem apresentar resultados confiáveis, com boa repetibilidade, opções de visualização gráfica e minimizar erros e distorções da superfície retificada.

Para a execução das medições dos resultados obtidos optou-se por equipamentos de alta precisão de forma a garantir a exatidão dos dados bem como o suporte adequado na tomada de decisão, um dos meios de medição adotado utiliza um apalpador que passa sobre a superfície (FIGURA 42), e o segundo não requer contato com a peça por se tratar de um feixe de luz incidente sobre a superfície. Além das informações dimensionais as características visuais são de extrema importância, dessa forma a utilização de um microscópio faz-se

necessária para a avaliação dos danos causados à superfície durante o processo de retificação, bem como a caracterização qualitativa. Os resultados aqui apresentados foram obtidos em um microscópio óptico Nomarsky.

3.5.1 Equipamento de medição com apalpador

Consiste em uma unidade eletrônica dotada de um pick up com um apalpador na extremidade (FIGURA 43 e 44) com o qual a superfície será tocada a fim de se obter o perfil (FIGURA 45).

FIGURA 42: Sistema de medição *Form Talysurf* da *Taylor Hobson*.

FIGURA 43: Componentes básicos do sistema de medição *Talysurf* (*Talysurf Intra* portátil)

FIGURA 44: Medição com apalpador

Os gráficos obtidos oferecem uma boa visualização do perfil da superfície, apresentando informações importantes como o comprimento medido, a que ponto se refere este comprimento, e as rugosidades da superfície. Estas informações são muito importantes no processo decisório, uma vez que permitem uma análise quantitativa e qualitativa da amostra.

TABELA 6 - Especificações do *Talysurf*

Unidade de medida	Valor
Comprimento transversal	1 - 50
$X_{\min}/máx$ (mm)	
Erro (plano)	0,4 μm acima de 50mm
	0.2 μm de 2 mm a 50 mm
Resolução Z	16 nm
Área de medição nominal	1 mm

A FIGURA 45 mostra a medição da amostra de vidro com o equipamento *Talysurf*

Intra.

FIGURA 45: Medição com apalpador

3.5.2 Equipamento de Medição 3-D

Este equipamento (FIGURA 46) pode gerar uma representação topográfica da superfície medida com resolução de 0,01nm no eixo Z com uma área de *scanner* de mais de 100µm mais 0.4µm de resolução lateral com mais de 1 milhão de pontos. As medições são feitas em segundos permitindo correções nos processos de obtenção das superfícies e manutenção das especificações de produto.

FIGURA 46: Equipamento de medição Talysurf CCI 3000 A

3.5.2.1 Princípio de funcionamento do sistema óptico

O sistema utiliza a ferramenta SCI *Scanning Broadband Interferometry* (SBI) para gerar as imagens tridimensionais. Um interferômetro objetivo é montado num dispositivo *piezo-scanner* que se movimenta verticalmente (na direção do eixo Z) sobre a peça (FIGURA 47). Os dados são coletados por uma câmera CCD e processados em um computador Xeon. O espectro de luz branca é analisado no interferômetro pelo CCI (*Coherence Correlation Interferometry*).

O resultado é um mapa da superfície com alta resolução em Z. As medições realizadas com este sistema tem resolução acima de 0.1 angstrom.

FIGURA 47: Componentes básicos do sistema de medição Talysurf

3.5.2.2 Características do sistema óptico

A TABELA 7 apresenta as características do *Talysurf* CCI 3000 A[®].

TABELA 7: Características do *Talysurf* CCI 3000A[®].

Técnica de medição	Interferômetro de escaneamento de alta precisão de banda larga SBI (<i>Ultra High resolutions Scanning Broadband Interferometry</i> utilizando o algoritmo CCI)
Capabilidade dimensional	3-dimensões, medidos sem contato
Medição de escaneamento rápido	<i>Scanner piezo</i> de <i>loop</i> fechado de alta repetibilidade com sensores capacitivos de alta linearidade
Lentes objetivas	2.5x, 5x, 10x, 20x e 50x
Medição	12 bit de alta sensibilidade câmera digital de 1M <i>pixel</i>
Fonte de luz externa	Lâmpada de luz halógena isolada de temperatura com controle preciso de largura
Estágios	Opções manual e motorizado
Monitor	Monitor duplo permitindo monitoramento e análise simultânea de dados em tempo real da amostra

A TABELA 8 apresenta as especificações do *Talysurf* CCI 3000A®.

TABELA 8 – Especificações Talysurf CCI 3000A®

Vertical (Z)	100µm
Resolução Vertical (max)	0.01nm
Repetibilidade RMS (Z)	0.003nm
Velocidade do Scanner vertical (max)	7µm / s
Área de medição (X, Y)	0.36mm ² - 7.2mm ²
Número de pontos de medição	1,048,576 (1024 x 1024 pixel)
Resolução lateral (X, Y)	0.36µm (max)
Repetibilidade - Altura	0.1nm (25µm step)
Linearidade (Z)	0.03% do valor medido
Pixel (Z)	0.2nm
Refletividade da superfície	0.3% - 100%
Tamanho da amostra (max)	X e Y = 300mm; Z = 200mm
Peso da amostra (max)	10 kg
Tempo médio de medição	10-20 segundos

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Serão discutidos nesse capítulo os resultados obtidos no experimento e a análise comparativa desses resultados com experimentos similares. Os resultados são apresentados em forma de gráficos obtidos através da interferometria óptica e microscopia.

A análise dos valores encontrados nas medições e dos valores de avanço e rotações adotados nos permite encontrar a melhor condição de usinagem para os valores adotados no experimento e fazer uma avaliação prévia da correlação existente entre os parâmetros de corte e o acabamento superficial obtido.

A FIGURA 48 tem como finalidade facilitar a localização dos pontos medidos na amostra:

FIGURA 48: Posição dos pontos de microscopia e medição de rugosidade.

A FIGURA 49 mostra a imagem da superfície com a transição de rugosidade exemplificada no modelo de transição do regime dúctil para o regime frágil (FIGURA 50). Essa transição ocorre devido à formação de fendas no regime frágil.

FIGURA 49: Transição de rugosidade ponto 16 (a) avanço 10^{-5} mm/rev (b) avanço 10^{-4} mm

FIGURA 50: Modelo da transição (vidro *Schott FK51*) Dúctil x Frágil (SINHOFF,1996)

Ra 24,092 nm Rq 35,642 nm	Ra 17,693 nm Rq 34,749 nm	Ra 17,997 nm Rq 25,553 nm	Ra 1,37768 nm Rq 1,80757 nm
V_f 1480 rpm	V_f 580 rpm	V_f 6000 rpm	V_f 9400 rpm
f 10^{-4} mm/rev	f 10^{-4} mm/rev	f 10^{-5} mm/rev	f 10^{-5} mm/rev

FIGURA 51: Fraturas superficiais e sub superficiais causadas na retificação do BK7

mostrando a transição do regime frágil para o regime dútil

A FIGURA 51 mostra a transição do regime frágil para o regime dútil em diferentes condições de usinagem, os melhores resultados obtidos com avanços menores (10^{-5} mm) são visivelmente evidenciados. Para avanços menores (10^{-4} mm) e diferentes rotações a diferença no acabamento superficial não é tão significativa, embora exista como mostram os valores de Ra.

FIGURA 52: (a) e (c) Rugosidade e (b) Microscopia óptica do ponto 13 (R_a 0,017693 μm ; R_q 0,034749 μm ; V_s = 580 rpm ; f =10⁻⁴ mm/rev)

FIGURA 53: Rugosidade na faixa do ponto 13 Talysurf (R_a 0,02 μm ; R_q 0,0296 μm)

A FIGURA 52 mostra os resultados de rugosidade obtidos com os parâmetros de usinagem mencionados. Pode se notar a homogeneidade na superfície embora o avanço tenha sido alto o que elevou a rugosidade, se comparado ao resultado obtido com menores avanços e maiores rotações (FIGURA 56).

FIGURA 54: (a) e (c) Rugosidade e (b) Microscopia óptica do ponto 12 . (Ra 0,024092 μm ;
 Rq 0,035642 μm ; $V_s = 1480 \text{ rpm}$; $f = 10^{-4} \text{ mm/rev}$)

A FIGURA 54 mostra os resultados de rugosidade obtidos com os parâmetros de usinagem mencionados, com variação na rotação do rebolo. Pode se notar uma pequena variação na homogeneidade na superfície embora o valor da amplitude pico vale tenha sido reduzida de $1,123 \mu\text{m}$ (FIGURA 52) para $0,645 \mu\text{m}$ (FIGURA 54). Isso não significa que a rotação exerça forte influência isoladamente no acabamento como será tratado mais adiante.

FIGURA 55. (a) e (c) Rugosidade e (b) Microscopia óptica do ponto 14. (R_a $0,017997 \mu\text{m}$;
 R_q $0,025553 \mu\text{m}$; $V_s = 6000 \text{ rpm}$; $f = 10^{-5} \text{ mm}$)

A significativa redução do avanço faz com que os valores de Ra e Rq sejam reduzidos expressivamente como mostra a FIGURA 55, o que comprova a geração de fendas na transição do regime dúctil para o regime frágil.

Com a manutenção do avanço e o aumento da rotação (FIGURA 56) pôde ser obtido um resultado satisfatório de rugosidade.

FIGURA 56: (a) e (c) Rugosidade e (b) Microscopia óptica do ponto 15. (Ra 1,37768 nm;
 Rq 1,80757 nm ; $V_s=9400$ rpm ; $f=10^{-5}$ mm/rev).

FIGURA 57: Condições iniciais da amostra de vidro no ponto 1 (R_a 3,00546 nm; R_q 1,03427nm).

Os resultados mostrados nesse capítulo mostram de forma clara o efeito do avanço da rugosidade da peça. A FIGURA 58 mostra a correlação entre o avanço e o acabamento obtido, a variação de rotação do cabeçote retificador de 580 rpma 9400 rpm foi levada em consideração sem, entretanto, apresentar uma correlação tão forte quanto o avanço. O estudo de correlação foi feito utilizando o Minitab®. A FIGURA 58 mostra que o intervalo de confiança para a correlação entre avanço e acabamento é igual ou maior que 95% para R_q , R_v ,

R_t R_{sm} . Se o intervalo de confiança for reduzido para 90% todas as rugosidades com exceção de R_p mostram correlação.

Results for: Worksheet 3

Correlations: rotação; avanço; Rug q; Rug a; Rug p; Rug v; Rug t; Rug z; Rug sm

	<u>rotação</u>	<u>avanço</u>	<u>Rug q</u>	<u>Rug a</u>	<u>Rug p</u>	<u>Rug v</u>	<u>Rug t</u>	<u>Rug z</u>
<u>avanço</u>	0,000 1,000							
<u>Rug q</u>	-0,247 0,753	0,954 0,046						
<u>Rug a</u>	-0,370 0,630	0,918 0,082	0,991 0,009					
<u>Rug p</u>	0,616 0,384	-0,469 0,531	-0,705 0,295	-0,747 0,253				
<u>Rug v</u>	-0,206 0,794	0,974 0,026	0,996 0,004	0,984 0,016	-0,643 0,357			
<u>Rug t</u>	-0,179 0,821	0,983 0,017	0,978 0,022	0,965 0,035	-0,553 0,447	0,992 0,008		
<u>Rug z</u>	-0,409 0,591	0,903 0,097	0,940 0,060	0,961 0,039	-0,589 0,411	0,951 0,049	0,965 0,035	
<u>Rug sm</u>	-0,311 0,689	0,950 0,050	0,983 0,017	0,987 0,013	-0,634 0,366	0,990 0,010	0,990 <u>0,010</u>	0,985 0,015
Cell Contents: Pearson correlation								
P-Value								

FIGURA 58: Tabela de correlação rotação/avanço e rugosidade

Na FIGURA 59 se verifica a forte influência do avanço e em segundo lugar a influência da variação do avanço e rotação juntos na rugosidade, evidenciado os resultados mostrados na FIGURA 58.

FIGURA 59: Pareto de correlação rotação (A) /avanço (B) e rugosidade

Comparando os resultados obtidos nesse experimento mostrados na FIGURA 56 com o gráfico da FIGURA 60 (OHMORI,2001), que mostra um comparativo entre o processo de retificação com ELID (*Electrolytic In process Dressing*) e a retificação convencional, pode-se verificar que os resultados são comparáveis ao experimento com o processo eletrolítico. O valor de Ra com ELID é de $0,018\mu\text{m}$ e o valor obtido no experimento foi de Ra $0,00137\mu\text{m}$, cabe ressaltar que o processo eletrolítico apresenta a vantagem da dressagem automática durante o processo o que garante a estabilidade dos resultados.

FIGURA 60: Comparativo da retificação com ELID e sem ELID (OHMORI,2001)

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

5.1 Conclusões

O desenvolvimento de sistemas ópticos, o uso do laser e conseqüentemente a necessidade de superfícies refrativas com alto grau de acabamento e precisão estão aumentando significativamente a demanda por pesquisas na usinagem de alta precisão. As superfícies obtidas com os usuais processos de polimento são limitadas a formas planas e esféricas e requerem muito tempo para se obter resultados satisfatórios. O desenvolvimento de pesquisas que aumentem o domínio desse processo são determinantes para que as demandas quantitativas e qualitativas sejam atendidas.

Este estudo apresentou uma análise dos acabamento superficial obtido em uma amostra de vidro óptico com diferentes condições de usinagem na operação de retificação de ultraprecisão com rebolo de diamante.

Pode se concluir com base nos resultados experimentais obtidos e na análise e comparação do trabalho:

- O efeito da variação da rotação não apresenta grande correlação com o acabamento isoladamente, ou seja, a melhoria na qualidade do acabamento superficial não é tão significativa variando-se apenas a rotação como mostrou a FIGURA 59;

- A variação do avanço de 10^{-4} para 10^{-5} mostra forte impacto no acabamento superficial atingindo rugosidades da ordem de $R_a = 0,018\mu\text{m}$ (FIGURA 55) e $R_a = 1,38\text{ nm}$ (FIGURA 56), evidenciando a remoção no regime dúctil com melhores resultados;
- A dressagem influencia diretamente o acabamento superficial, ou seja, a dressagem manual é um fator que influencia negativamente o acabamento além de representar paradas indesejadas na operação.

As conclusões e resultados obtidos evidenciam o surgimento de trincas durante a usinagem devido aos efeitos do avanço que define o regime de remoção de material. Como mostrado na FIGURA 49 é clara a transição entre os regimes dúctil e frágil para avanços de 10^{-5} mm/rev e 10^{-4} mm/rev respectivamente, esse fato se deve ao aumento da energia de formação de fratura (E_f) em relação à energia de escoamento plástico (E_p) (FIGURA 33) quando se aumenta o avanço.

A retificação de superfícies anesféricas tem sido pouco explorada no Brasil. A carência de informações sobre esse processo torna seu desenvolvimento um desafio para pesquisadores e fabricantes no atendimento às demandas do mercado.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

A seguir algumas sugestões para trabalhos a fim de complementar o desenvolvimento de retificação de materiais frágeis:

- Utilizar o processo de dressagem eletrolítica;
- Monitorar os desgastes do rebolo de diamante;
- Analisar a influência do desgaste do rebolo no acabamento superficial;
- Utilizar outras técnicas para análise dos resultados na superfície (Microscopia de Força Atômica);
- Utilizar outros vidros ópticos e comparar os resultados;
- Comparar os resultados obtidos com rebolos resinados e metálicos;
- Variar os parâmetros de corte com um número de replicações significativo.

6 REFERÊNCIAS

6.1 Referência citada

ALMEIDA, R. M.. Estudos de retificação de ultraprecisão de materiais frágeis. Escola de engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo. 2001

BIFANO, T. G.; Dow, T.A.; Scattergood, R. O. Ductile – Regime grinding of brittle materials. UPT –Ultraprecision Technology – Sprinter – Verlag, Braunschweig, (1987)

BIFANO, T. G.; Dow, T.A.; Scattergood, R. O. Ductile –Regime grinding: a new technology for machining brittle materials, *Journal of engineering for Industry, Transactions of ASME*, (1991)

HANS, H. G.; Maetzig, J. C. Institute for Microtechnology, Hanover University, Hanover, Germany. Precision Engineering. Elsevier Science Inc.. vol 21, p. 134 – 139, 1997

KISTLER, B.; Stogran, C.; Bott, L. *Design and fabrication of a dc source for electrolytic dressing* Produced by: Kistler, B.; Stogran, C.; Bott, L. Disponível em: <<http://www-mime.eng.utoledo.edu/design%5Fclinic/design%5Fexpo/Fall04Pages/2004%2D04%2D02/>

Acesso em: 08 nov. 2005

KOMANDURI, Lucca, D. A. Tani, Y.* Technological advances in fine abrasive processes. Mechanical & Aerospace Engineering, Oklahoma State University, Stillwater. * Institute of

Industrial Science, University of Tokyo, Tokyo, Japan. Annals of the CIRP, v 10, p. 545 – 596, 1997

KÖNIG, W. ; Weck, M. ; Spenrath, N. ; Luderich, J. Diamond Machining Technology. Franhofer – Institut Produktionstechnologie (IPT), Aachen, 1991

LUCCA, D. A.; Brinkismeier, E. Goch, G.. Oklahoma State University, Stillwater, OK, USA. Universität Bremen, Bremen, Germany. Annals of the CIRP, vol 47, p. 669 – 690

MALKIN, S. Grinding Technology: theory and application of machining with abrasives, Ellis Horwood Limited, Chichester, 1989

OHMORI, H; NAKAGAWA, T. *Analisis of mirror surface generation of hard and brittle material by ELID (Eletronic In process dressing) Grinding with superfine grain metallic bond wheels. Annals of the CIRP, 1995*

OPTICAL GLASS. Produced by Georg N. Nyman. Disponível em: <http://www.gnyman.com/Personal/Optical%20Glass.htm>. Acesso em: 27 set. 2005

PARKER, C. J. Optical Materials – Refractive, chap 2 . In: Applied Optics and Optical engineering, R. R. Salomon and J. C. Wyant Eds., vol. VII, Academic Press, New York, 1979

SINHOFF, V. R. Feinbearbeitung optischer Gläser in der Kleinserie. Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. Shaker Verlag, GmbH, Aachen, 1996

WALKER, B.H.J. The 20% Rule: Selecting Optical glass, Optical Spectra, 1978

YODER, Paul R. Opto-Mechanical Systems Design. Optical engineering; v. 9. Danbury, Connecticut. Marcel Dekker Inc., 1986. p. 57 - 61

Zanotto, E.D. *Science News*, v. 153, No. 22, May 30, 1998, p. 341.

Zanotto, E.D. *Do cathedral glasses flow? American Journal of Physics* 66. 1998. p. 392

6.2 Referência consultada

ABERRAÇÕES : Banco de dados preparado por Márcia In: Instituto de Física – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: < <http://www.if.ufrgs.br/~marcia/aberr.pdf>>
Acesso em: 16 out. 2005.

*ABERRATIONS- ASTIGMATISM. Produced by Aberrator Astronomy.*Disponível em:<
<http://aberrator.astronomy.net/html/astigmatism.html>> Acesso em 08 nov 2005

ASPHERICAL LENSES. Produce by Canon Technology. Disponível em:
http://www.canon.com/technology/canon_tech/explanation/aspherical.html .Acesso em: 05
ago. 2005

ASPHERICAL LENSES. Produce by Canon Technology. Disponível em:
http://www.canon.com/technology/canon_tech/explanation/aspherical.html .Acesso em: 05
ago. 2005

*ABERRATIONS- ROUGHNESS. Produced by Aberrator Astronomy.*Disponível em:
<http://aberrator.astronomy.net/html/roughness.html>. Acesso em 08 nov 2005

*ABERRATIONS- COMA. Produced by Aberrator Astronomy.*Disponível em:
http://aberrator.astronomy.net/html/body_coma.html Acesso em 08 nov 2005

GLOSSÁRIO GEOLÓGICO. Produced by M. Winge et al_ 2001. Disponível em:
<http://www.unb.br/ig/glossario/index.html>. Acesso em: 14 ago. 2006.

LENS (OPTICS) Produced by Wikipedia®. Disponível em:
 <[http://en.wikipedia.org/wiki/Lens_\(optics\)#Types_of_lenses](http://en.wikipedia.org/wiki/Lens_(optics)#Types_of_lenses)> . Acesso em: 27 ago. 2006

OPTICAL ABERRATIONS. Produced by Kenneth. Disponível em:
 <[HTTP://WWW.ASTROSURF.ORG/LOMBRY/REPORT-ABERRATIONS.HTM](http://WWW.ASTROSURF.ORG/LOMBRY/REPORT-ABERRATIONS.HTM)>. Acesso
 em: 08 nov. 2005

OPTICAL ABERRATION. Produced by Tiscali.Reference. Disponível em:
 <<http://www.tiscali.co.uk/reference/encyclopaedia/hutchinson/m0010241.html>> . Acesso em:
 15 out. 2005

OPTICAL ABERRATIONS- ASTIGMATISM (III). Produced by Kenneth. Disponível em:
<http://www.astrosurf.org/lombry/report-aberrations3.htm>

OPTICAL ABERRATIONS- CHROMATIC ABERRATION. Produced by Kenneth R. Spring
 Michael W. Davidson. In: Nikon Inc. Disponível
 em: <http://www.microscopyu.com/tutorials/java/aberrations/chromatic/index.html> Acesso em:
 15 out. 2005

OPTICAL ABERRATIONS- CHROMATIC ABERRATION. Produced by Kenneth. Disponível
 em: <http://www.astrosurf.org/lombry/report-aberrations2.htm>. Acesso em: 08 nov. 2005

OPTICAL ABERRATIONS- COMA. Produced by Kenneth. Disponível em: <http://www.astrosurf.org/lombry/report-aberrations2.htm>. Acesso em: 08 nov. 2005

OPTICAL ABERRATIONS- DISTORTION. Produced by Kenneth. Disponível em: <http://www.astrosurf.org/lombry/report-aberrations3.htm> Acesso em: 08 nov. 2005

OPTICAL ABERRATIONS- FIELD CURVATURE. Produced by Kenneth. Disponível em: <http://www.astrosurf.org/lombry/report-aberrations3.htm> Acesso em: 08 nov. 2005

OPTICAL ABERRATIONS- SPHERICAL ABERRATION. Produced by Kenneth. Disponível em: <http://www.astrosurf.org/lombry/report-aberrations2.htm>
Acesso em: 08 nov. 2005

POLISHING PROCESS. CONSUMABLES. Produced by Ukam. Disponível em: <http://www.ukam.com/smartcutlp.pdf> Acesso em: 08 ago. 2005

SELLMEIER EQUATION Produced by Wikipedia®. Disponível em: http://en.wikipedia.org/wiki/Sellmeier_equation . Acesso em: 13 ago. 2006.

SUBSURFACE DAMAGE IN MICROGRINDING OPTICAL GLASSES. Produced by LLE Review. Disponível em: http://www.lle.rochester.edu/pub/review/v73/7_subsurface.pdf
Acesso em: 20 set. 2006.

SUMITA OPTICAL GLASS Produced by SUMITA ®. Disponível em: <http://www.sumita-opt.co.jp> . Acesso em: 27 set. 2005.

TECHNICAL INFORMATION.OPTICS FOR DEVICES. BUBBLES AND INCLUSIONS IN OPTICAL GLASS p. 2/9. Produced by *Schott* AG. Disponível em:
http://www.schott.com/optics_devices/english/download/tie-28_bubbles_and_inclusions.pdf

Acesso em: 12 fev. 2006.

7 ANEXOS

$n_d = 1.51680$		$v_d = 64.17$	$n_f - n_e = 0.008054$		N-BK7 517642.251			
$n_e = 1.51872$		$v_e = 63.96$	$n_f - n_c = 0.008110$					
Índice de Refração			Transmissividade Interna			Dispersão Parcial Relativa		
	λ [nm]		λ [nm]	τ [10 mm]	τ [25 mm]	$P_{s,t}$	0.3098	
$n_{2325.4}$	2325.4	1.48921	2500	0.67	0.36	$P_{C,s}$	0.5612	
$n_{1970.1}$	1970.1	1.49495	2325	0.79	0.56	$P_{d,C}$	0.3076	
$n_{1529.6}$	1529.6	1.50091	1970	0.930	0.84	$P_{e,d}$	0.2386	
$n_{1060.0}$	1060.0	1.50669	1530	0.992	0.980	$P_{g,F}$	0.5349	
n_t	1014.0	1.50731	1060	0.999	0.997	$P_{i,h}$	0.7483	
n_s	852.1	1.50980	700	0.998	0.996			
n_r	706.5	1.51289	660	0.998	0.994	$P'_{s,t}$	0.3076	
n_C	656.3	1.51432	620	0.998	0.994	$P'_{C,s}$	0.6062	
$n_{C'}$	643.8	1.51472	580	0.998	0.995	$P'_{d,C}$	0.2566	
$n_{632.8}$	632.8	1.51509	546	0.998	0.996	$P'_{e,d}$	0.2370	
n_D	589.3	1.51673	500	0.998	0.994	$P'_{g,F}$	0.4754	
n_d	587.6	1.51680	460	0.997	0.993	$P'_{i,h}$	0.7432	
n_e	546.1	1.51872	436	0.997	0.992			
n_F	486.1	1.52238	420	0.997	0.993			
$n_{F'}$	480.0	1.52283	405	0.997	0.993	Desvio da Dispersão Parcial Relativa ΔP		
n_g	435.8	1.52668	400	0.997	0.992	da "Linha Normal"		
n_h	404.7	1.53024	390	0.996	0.989	$\Delta P_{c,t}$	0.0216	
n_i	365.0	1.53627	380	0.993	0.983	$\Delta P_{c,a}$	0.0087	
$n_{334.1}$	334.1	1.54272	370	0.991	0.977	$\Delta P_{F,e}$	-0.0009	
$n_{312.6}$	312.6	1.54862	365	0.988	0.971	$\Delta P_{g,F}$	-0.0009	
$n_{296.7}$	296.7		350	0.967	0.920	$\Delta P_{i,g}$	0.0035	
$n_{280.4}$	280.4		334	0.910	0.78			
$n_{248.3}$	248.3		320	0.77	0.52			
			310	0.57	0.25			
			300	0.29	0.05	Outras Propriedades		
Constantes de Dispersão						$\alpha_{-30/+70^{\circ}C}[10^{-6}/K]$	7.1	
B_1	1.03961212.10					$\alpha_{+20/+300^{\circ}C}[10^{-6}/K]$	8.3	
B_2	2.31792344.10					$T_g[^{\circ}C]$	557	
B_3	1.01046945.10					$T_{10}^{13.0}[^{\circ}C]$	557	
C_1	6.00069867.10					$T_{10}^{7.6}[^{\circ}C]$	719	
C_2	2.00179144.10		250			$c_p[J/(g \cdot K)]$	0.858	
C_3	1.03560653.10					$\lambda[W/(m \cdot K)]$	1.114	
Constantes de Fórmula dn/dt			Código Cor			$p[g/cm^3]$	2.51	
D_0	1.86.10		λ_{80}/λ_5	33/29		$E[10^3 N/mm^2]$	82	
D_1	1.31.10					μ	0.206	
D_2	-1.37.10		Remarks			$K[10^{-6} mm^2/N]$	2.77	
E_0	4.34.10						$HK_{0.1/20}$	610
E_1	6.27.10				HG	3		
$\lambda_{TK[mm]}$	0.170					B	0	
Coeficientes de temperatura do índice de refração								
	$\Delta n_{re}/\Delta T[10^{-6}/K]$			$\Delta n_{ab}/\Delta T(10^{-6}/K)$				
$[^{\circ}C]$	1060.0	e	g	1060.0	e	g		
-40/-20	2.4	2.9	3.3	0.3	0.8	1.2	CR	2
+20/+40	2.4	3.0	3.5	1.1	1.6	2.1	FR	0
+60/+80	2.5	3.1	3.7	1.5	2.1	2.7	SR	1
CATALOGUE 2000						AR	2	
						PR	2.3	
						SCHOTT Optical Glass		

ANEXO 1: Reprodução da tabela BK7 (Schott Optical Glass).

$n_d = 1.43425$	$v_d = 94.95$	$n_f - n_c = 0.004573$	N-FK56 434950.354					
$n_e = 1.43534$	$v_e = 94.53$	$n_f - n_c' = 0.004606$						
Índice de Refração			Transmissividade Interna			Dispersão Parcial Relativa		
	λ [nm]		λ [nm]	τ [10 mm]	τ [25 mm]	$P_{s,t}$	0,2942	
$n_{2325.4}$	2325,4	1,42033	2500			$P_{C,s}$	0,5521	
$n_{1970.1}$	1970,1	1,42294	2325			$P_{d,C}$	0,3072	
$n_{1529.6}$	1529,6	1,42575	1970	0,992	0,979	$P_{e,d}$	0,2389	
$n_{1060.0}$	1060,0	1,42865	1530	0,996	0,991	$P_{g,F}$	0,5329	
n_t	1014,0	1,42898	1060	0,998	0,996	$P_{i,h}$	0,7345	
n_s	852,1	1,43032	700	0,998	0,996			
n_r	706,5	1,43204	660	0,998	0,996	$P'_{s,t}$	0,2921	
n_C	656,3	1,43285	620	0,998	0,996	$P'_{C,s}$	0,5970	
$n_{C'}$	643,8	1,43307	580	0,998	0,996	$P'_{d,C}$	0,2563	
$n_{632.8}$	632,8	1,43328	546	0,998	0,996	$P'_{e,d}$	0,2372	
n_D	589,3	1,43421	500	0,998	0,996	$P'_{g,F}$	0,4734	
n_d	587,6	1,43425	460	0,998	0,996	$P'_{i,h}$	0,7294	
n_e	546,1	1,43534	436	0,998	0,995			
n_F	486,1	1,43742	420	0,998	0,994	Desvio da Dispersão Parcial Relativa ΔP da "Linha Normal"		
n_F'	480,0	1,43768	405	0,998	0,996			
n_g	435,8	1,43986	400	0,998	0,996	$\Delta P_{c,t}$	-0,1491	
n_h	404,7	1,44185	390	0,998	0,995	$\Delta P_{c,a}$	-0,0722	
n_i	365,0	1,44521	380	0,997	0,992	$\Delta P_{F,e}$	0,0155	
$n_{334.1}$	334,1	1,44877	370	0,994	0,985	$\Delta P_{g,F}$	0,0488	
$n_{312.6}$	312,6	1,45197	365	0,990	0,975	$\Delta P_{i,g}$	0,2434	
$n_{296.7}$	296,7		350	0,967	0,920			
$n_{280.4}$	280,4		334	0,900	0,76			
$n_{248.3}$	248,3		320	0,73	0,46			
			310	0,54	0,21	Outras Propriedades		
Constantes de Dispersão			300	0,33	0,06	$\alpha_{-30/+70^{\circ}\text{C}}[10^{-6}/\text{K}]$		
B_1	9.11957171.10		290	0,14	0,01	$\alpha_{+20/+300^{\circ}\text{C}}[10^{-6}/\text{K}]$	16,2	
B_2	1.28580417.10		280	0,06		$T_g[^{\circ}\text{C}]$	422	
B_3	9.83146162.10		270	0,02		$T_{10}^{13,0}[^{\circ}\text{C}]$	416	
C_1	4.50933489.10		260	0,01		$T_{10}^{7,6}[^{\circ}\text{C}]$		
C_2	1.53515963.10		250			$c_p[\text{J}/(\text{g}\cdot\text{K})]$	0,750	
C_3	2.23961126.10					$\lambda[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	0,840	
Constantes de Fórmula dn/dt			Código Cor			$\rho[\text{g}/\text{cm}^3]$	3,54	
D_0	-2.04.10		λ_{80}/λ_5	33/28		$E[10^3\text{N}/\text{mm}^2]$	70	
D_1	-1.03.10					η	0,293	
D_2	2.43.10		Remarks			$K[10^{-6}\text{mm}^2/\text{N}]$	0,68	
E_0	3.41.10					$HK_{0,1/20}$	350	
E_1	4.37.10					HG		
$\lambda_{TK[\text{nm}]}$	0,138					B	1	
Coeficientes de temperatura do índice de refração								
	$\Delta n_{re}/\Delta T[10^{-6}/\text{K}]$			$\Delta n_{ab5}/\Delta T(10^{-6}/\text{K})$				
[$^{\circ}\text{C}$]	1060,0	e	g	1060,0	e	g		
-40/-20	-5,0	-4,8	-4,6	-7,0	-6,8	-6,6	CR	1
+20/+40	-6,2	-5,9	-5,6	-7,4	-7,1	-6,9	FR	0
+60/+80	-6,7	-6,4	-6,2	-7,7	-7,4	-7,1	SR	52-53,3
CATALOGUE 2000							AR	4,3
							PR	4,3
							SCHOTT Optical Glass	

ANEXO 2: Reprodução da tabela N-FK56 (Schott Optical Glass).

$n_d = 1.92286$			$V_d = 20.88$			$n_f - n_c = 0.044189$			SF66 923209.603								
$n_e = 1.93325$			$V_e = 20.73$			$n_f - n_c = 0.045030$											
Índice de Refração						Transmissividade Interna						Dispersão Parcial Relativa					
λ [nm]						λ [nm]						$P_{s,t}$					
2325,4						2500						0,1895					
1970,1						2325						0,4446					
1529,6						1970						0,2835					
1060,0						1530						0,2351					
1014,0						1060						0,6284					
852,1						700						$P_{i,h}$					
706,5						660						0,1860					
656,3						620						$P'_{s,t}$					
643,8						580						0,4793					
632,8						546						$P'_{C,s}$					
589,3						500						0,2352					
587,6						460						$P'_{d,C}$					
546,1						436						0,2307					
486,1						420						$P'_{e,d}$					
480,0						405						$P'_{g,F}$					
435,8						400						$P'_{i,h}$					
404,7						390						0,5549					
365,0						380						Desvio da Dispersão Parcial Relativa ΔP					
334,1						370						da "Linha Normal"					
312,6						365						$\Delta P_{c,t}$					
296,7						350						-0,0099					
280,4						334						$\Delta P_{c,a}$					
248,3						320						-0,0069					
						310						$\Delta P_{F,e}$					
						300						0,0040					
						290						$\Delta P_{g,F}$					
						280						$\Delta P_{i,g}$					
						270											
						260											
						250											

ANEXO 3: Reprodução da tabela SF66 (Schott Optical Glass).