

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
Faculdade de Ciências/Campus de Bauru
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de
Materiais

Marcelo Gomes Bacha

**Construção de um Interferômetro de Bath para análise da
superfície de vidros usados na confecção de espelhos
côncavos**

Bauru
2012

Marcelo Gomes Bacha

Construção de um Interferômetro de Bath para análise do comportamento da superfície de vidros usados na confecção de espelhos côncavos

Dissertação apresentada como requisito à obtenção do título de Mestre à Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” – Programa de Pós- Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, sob Orientação da Prof^a. Dr^a. Rosa Maria Fernandes Scalvi

Bauru

2012

Bacha, Marcelo Gomes.

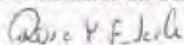
Construção de um Interferômetro de Bath para análise da superfície de vidros usados na confecção de espelhos côncavos / Marcelo Gomes Bacha, 2012
113 f.

Orientador: Rosa Maria Fernandes Scalvi

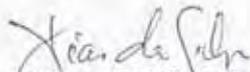
Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade Ciências, Bauru, 2010

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE MARCELO GOMES BACHA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS, DO(A) FACULDADE DE CIÊNCIAS DE BAURU.

Aos 14 dias do mês de fevereiro do ano de 2012, às 15:00 horas, no(a) Anfiteatro da Pós-graduação / FC, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Profa. Dra. ROSA MARIA FERNANDES SCALVI do(a) Departamento de Física / Faculdade de Ciências de Bauru, Prof. Dr. JOSE HUMBERTO DIAS DA SILVA do(a) Departamento de Física / Faculdade de Ciências de Bauru, Prof. Dr. EDUARDO BELLINI FERREIRA do(a) Departamento de Engenharia de Materiais / USP / São Carlos, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de MARCELO GOMES BACHA, intitulado "CONSTRUÇÃO DE UM INTERFEROMETRO DE BATH PARA ANÁLISE DA SUPERFÍCIE DE VIDROS USADOS NA CONFECÇÃO DE ESPELHOS CONCAVOS". Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: _____ APROVADO _____. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.



Profa. Dra. ROSA MARIA FERNANDES SCALVI



Prof. Dr. JOSE HUMBERTO DIAS DA SILVA



Prof. Dr. EDUARDO BELLINI FERREIRA

*Dedico esse trabalho aos meus pais
que sempre me incentivaram e me
deram suporte pra realizar meus
sonhos.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente ao Sr. Lionel a sua esposa Cida, a sua irmã Luzia e a seu filho Anderson, que desde o início da minha jornada em Bauru, sempre me acolheram como um filho.

Agradeço com todo carinho a Prof. Rosa, que durante seis anos foi mais do que professora e orientadora, mostrou o porque do seu apelido dado carinhosamente pelos alunos “mãe Rosa”. Agradeço também pela oportunidade de trabalhar durante 6 anos e principalmente por sua paciência ao orientar em um momento tão delicado de sua vida.

Agradeço carinhosamente a minha vó, minha irmã e a todos os meus familiares (tios, tias, primos e primas) que sempre me incentivaram nessa árdua jornada.

Agradeço a Larissa que durante o ultimo ano sempre me ajudou a enfrentar todos os desafios da vida, sempre tão amável e compreensiva. Agradeço também a seus pais por todo o carinho que recebi.

Agradeço a Sandro Coletti pela ajuda mesmo que apenas por telefone na montagem do interferômetro, pelas discussões sobre o mesmo e auxilio na utilização dos softwares.

Agradeço a todos os amigos e irmãos da família Filhos de Alborghetti, em especial ao Alysson por todas suas orações.

Agradeço a equipe do Observatório Didático Lionel José Andriatto da UNESP Bauru, pela colaboração no trabalho.

Agradeço ao Acácio pelo auxilio na compra dos equipamentos para montagem da mesa óptica, dos componentes do interferômetro e das suas palavras sábias.

Agradeço a Bruno, Haylton e Edmilson pelos dados da estação meteorológica, calibragem do interferômetro, melhoria na captação de imagens e auxilio na interpretação das imagens captadas.

Agradeço a equipe de professores da Fundação CEU, que durante dois anos foram mais que parceiros em auxiliar e emprestar materiais para pesquisa, foram realmente amigos e irmãos.

Agradeço a Ariadne, Larisa e Ziane que me ajudaram nas medidas de difração de Raio X.

Agradeço a generosidade de Marcos Gibbim e o CETEV pela medida de Fluorescência de Raio X.

A Fundação CEU por ceder o espelho do seu telescópio Newtoniano para análise.

Agradeço aos professores Vicente, Paulo, Humberto e Thomaz que contribuíram com conselhos para a melhoria no trabalho.

Agradeço a Mauro Akerman pelos materiais didáticos cedidos.

“Estrutura, Disciplina e Planejamento”

RESUMO

Neste trabalho foi comparado o desempenho dos dois vidros mais utilizados na fabricação de espelhos côncavos de médio porte (até 25 cm de diâmetro). Os materiais analisados foram vidros nos sistemas soda-cálcico e boro-silicato. Os espelhos foram comparados em relação à dilatação térmica e à sua rigidez elástica, tendo como principal objetivo avaliar qual vidro deformaria menos sua superfície mantendo sua qualidade óptica em relação à variação da temperatura e do seu próprio peso. Para tanto, a análise foi realizada através dos resultados captados pelo interferômetro de Bath, montado no Observatório Didático de Astronomia “Lionel José Andriatto”, da Faculdade de Ciências, UNESP, Bauru.

Como amostras para o trabalho, foram utilizados espelhos primários côncavos de telescópios Newtonianos construídos com os vidros analisados. As medidas foram inspiradas nas condições que os espelhos sofrem durante seu uso, ambientes com temperatura variável e efeitos causados pela gravidade quando os espelhos estão na posição vertical. Ainda para testar a rigidez elástica dos vidros, os espelhos foram apoiados apenas pelas bordas. Os parâmetros utilizados para verificar o desempenho da superfície dos espelhos, foram deformação na curvatura, somatória das deformações na frente de onda e fator Strehl. Utilizando as franjas de interferometrias que foram associadas aos polinômios de Zernike por análise computacional, foi possível realizar o levantamento dos defeitos na superfície com precisão de nanômetros.

Através dos dados obtidos no trabalho foi possível confirmar o desempenho superior do espelho feito com vidro de boro-silicato, esse material se apresentou mais estável em todas as medidas realizadas, sofrendo deformações na superfície menores que o vidro soda-cálcico.

Palavras Chave: Interferômetro de Bath, Polinômios de Zernike, espelhos de telescópio, vidro, efeitos de temperatura, rigidez elástica.

ABSTRACT

This work aims to compare the performance of two types of glasses, which are the most used in the manufacture of medium sized concave mirrors (up to 25 cm of diameter). The investigated materials were soda-lime and borosilicate glasses. The mirrors were compared concerning their thermal expansion and their elastic rigidity, and the main goal was to find out which glass would have a less deformed surface, maintaining the optical quality, under temperature variation and the mirror weight itself. In order to accomplish that, an analysis was carried out based on data collected by the Bath interferometer, built in the Didactic Astronomy Observatory “Lionel José Andriatto”.

As samples for this work, it was used concave primary mirrors of Newtonian telescopes built with these glasses. The measurements were based on conditions that mirrors are exposed during their regular use, such as variable temperature environments and gravity effects when the mirrors are kept upright. Besides, to test the rigidity, the glass mirrors were held only by the edges. To check the performance, the used parameters were deformation in curvature, the sum of the wavefront deformations and Strehl factor. Interferometer fringes were associated with Zernikes polynomials by computational analyses, making possible a survey of defects on the surface with nanometer accuracy.

Using data obtained in this study, it was possible to confirm the superior performance of the mirror built with borosilicate glass, which was the most stable sample in all the measurements, presenting less surface deformations when compared with the soda-lime glass.

Keywords: Bath Interferometer, Zernike polynomials, telescope mirrors, temperature effect, elastic rigidity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diferença entre estrutura de um sólido cristalino (a) e amorfo (b).....	21
Figura 2 - Variação do volume de materiais cristalino e amorfo em função da temperatura	22
Figura 3 – Diagrama dos efeitos causados pela adição de óxidos no vidro, os óxidos em destaque são os óxidos utilizados na composição dos vidros analisados.....	23
Figura 4 – Efeitos da diferença de dilatação térmica entre o vidro e o alumínio.....	24
Figura 5 – Imagem do espelho analisado, na etapa de polimento, utilizando teste de Foucault.....	26
Figura 6 – Configuração do teste de fendas de Young.....	28
Figura 7 – Diferença entre caminhos ópticos percorridos pelas ondas r_1 e r_2	29
Figura 8 – Ponto focal gerado por uma lente perfeita através da óptica geométrica [4].....	30
Figura 9 – Coordenadas polares na fenda de abertura circular.....	31
Figura 10 – Intensidade luminosa devido a distância do disco central de Airy. Figura adaptada [4, 14].....	33
Figura 11 – Defeito na superfície do espelho deformando a frente de onda [4].....	34
Figura 12 – Superfícies tridimensionais geradas pelos polinômios de Zernike [15].....	37
Figura 13 – Formação do Δp causada por uma frente de onda esférica em um espelho parabólico. Figura adaptada [4].....	40
Figura 14 – Representação da curvatura do espelho segundo o valor de b [4].....	41
Figura 15 – Configuração utilizada na ocular da <i>webcam</i> para captar imagens (Imagem adaptada) [4].....	43
Figura 16 – Interferômetro de Bath montado, sendo O o conjunto das lentes da ocular de 20 mm, C o cubo divisor de Feixe, LA o <i>laser</i> , W a <i>webcam</i> , L a lente biconvexa e EP o espelho plano.....	44
Figura 17 – Caminho do feixe de teste, sendo C o cubo divisor de Feixe, LA o <i>laser</i> , O ocular, W a <i>webcam</i> , L a lente biconvexa, ET o espelho testado e EP o espelho plano (imagem adaptada) [16].....	46
Figura 18 – Caminho do feixede referência, sendo C o cubo divisor de Feixe, LA o <i>laser</i> , O ocular, W a <i>webcam</i> , L a lente biconvexa e EP o espelho plano (imagem adaptada) [16].....	48
Figura 19 – Esquema representando os dos dois feixes juntos no interferômetro e as franjas formadas [16].....	49

Figura 20 a – Imagem gerada por desalinhamento nas lentes da ocular. b - Franjas sem definição de imagem devido a grande distância entre as lentes oculares.....	50
Figura 21 – Apenas o feixe de teste captado na <i>webcam</i> devido ao desalinhamento no conjunto óptico.....	51
Figura 22 – Alinhamento dos dois feixes gerados no cubo divisor de feixe, distância entre eles não deve ser maior que 6 mm.....	52
Figura 23 – Alinhamento da frente de onda esférica criada por L e o feixe de referência.....	52
Figura 24 – Feixes de teste e referência ao retornar a C.....	53
Figura 25 – Somatória dos feixes gerando as franjas de interferometria.....	54
Figura 26 – Disco central de interferometria em sua máxima expansão entre o foco marginal e paraxial.	54
Figura 27 – Posição das franjas de interferometria devido ao deslocamento do interferômetro nos eixos YZ. Figura adaptada [17].....	55
Figura 28 – Deslocamento no eixo Y do interferômetro e comportamento das franjas de interferometria do espelho testado.....	55
Figura 29 – Centro de interferometria de um espelho quase esférico antes do ponto focal, no ponto focal e após o ponto focal.....	56
Figura 30 – Franjas retas de um espelho esférico [12].....	57
Figura 31 a – Coma. b - Astigmatismo. c - Aberração esférica [13].....	57
Figura 32 a- Coma e Aberração esférica.b - Astigmatismo e Coma. c – Astigmatismo e coma. d - Aberração esférica, coma e astigmatismo [13].....	58
Figura 33 – Padrão das franjas de interferometria entre espelhos esféricos e parabólicos. Figura adaptada [17].....	59
Figura 34 – Coordenadas tridimensionais do interferômetro de Bath [17].....	60
Figura 35 – Imagem computacional em 3D da superfície do espelho testado, gerada pelo programa.....	63
Figura 36 – Espelhos T1, M1 e P1 nos seus suportes planos na horizontal.....	65
Figura 37 – Variação de temperatura durante o dia 05/08/2011.....	66
Figura 38 - Variação de temperatura durante o dia 08/07/2011.....	67
Figura 39 – Variação de temperatura durante os dias 26 e 27/07/2011.....	67
Figura 40 – Espelhos P1 e T1 com seus suportes na vertical.....	68

Figura 41 – Espelhos apoiados apenas por dois pontos em sua borda, para determinar as deformações causadas pelo seu próprio peso.....	69
Figura 42 – Excitação do nível eletrônico interno e possibilidades de preenchimento da vacância [23].....	71
Figura 43 - Difratoograma de uma amostra de Quartzo alfa [24].....	72
Figura 44 – Difração de Raios X de uma estrutura amorfa.....	73
Figura 45 – Mapa de relevo do espelho T1 para medidas em função da temperatura.....	76
Figura 46 – Modificações na superfície do espelho P1 em diferentes temperaturas.....	79
Figura 47 – Mapa de relevo do espelho comercial para a variação das medidas.....	81
Figura 48 – Variação de temperatura externa ao laboratório durante o dia 28/08/2011.....	83
Figura 49 – Representação da superfície 3D dos espelhos T1 e Comercial apoiados por dois pontos da borda durante 24 e 48 horas.....	90
Figura 50 – Reprodução do espelho M1 em 3D.....	91
Figura 51 – Imagem de interferometria do espelho M1.....	91
Figura 52 – Reprodução do espelho T1 em 3D.....	92
Figura 53 – Imagem de interferometria do espelho T1.....	92
Figura 54 – Reprodução do espelho P1 em 3D.....	93
Figura 55 – Imagem de interferometria do espelho P1.....	93
Figura 56 – Reprodução do espelho Comercial em 3D.....	94
Figura 57 – Imagem de interferometria do espelho Comercial.....	94
Figura 58 – A esquerda a máscara de A. Couder com cinco zonas e sua utilização no teste de Foucault a direita.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química dos vidros em % de massa.....	24
Tabela 2 – Índice de dilatação superficial.....	25
Tabela 3 – Intensidade Y do padrão de Airy em relação a distância X do disco central.....	32
Tabela 4 – Os 36 polinômios de Zernike [18].....	36
Tabela 5 – Características gerais dos espelhos analisados.....	64
Tabela 6 – Relação entre o raio de abertura e espessura dos espelhos.....	69
Tabela 7 – Parâmetros ideais de cada espelho gerado pelo programa <i>OpenFringe</i> a qualquer temperatura.....	74
Tabela 8 – Curvatura do espelho relacionada ao Fator b	74
Tabela 9 – Comportamento do espelho T1 com a variação de temperatura.....	75
Tabela 10 – Comportamento do espelho P1 com a variação de temperatura.....	78
Tabela 11 – Comportamento do espelho Comercial com a variação de temperatura.....	80
Tabela 12 – Comportamento do espelho M1 com a variação de temperatura.....	82
Tabela 13 - Comportamento dos espelhos M1 a temperatura fixa de 16°C.....	83
Tabela 14 – Cone de luz formado pelos espelhos analisados.....	84
Tabela 15 – Comportamento dos espelhos T1, P1 e Comercial a temperatura de 16°C.....	85
Tabela 16 – Resultados de interferometria obtidos para os espelhos T1, P1 e Comercial mantidas na posição vertical por 24 e 48 horas a 16°C.....	87
Tabela 17 – Resultados obtidos para os espelhos T1 e Comercial, apoiados pelas bordas durante 24 e 48 horas.....	89
Tabela 18 – Composição química em % de massa do vidro soda-cálcico do espelho T1 e vidro soda-cálcico obtido na literatura [1].....	96

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

a - parâmetro de rede cristalina

a' - raio de abertura da fenda

A_0 - área inicial

A_n , B_{nm} e C_{nm} - coeficientes individuais dos polinômios

A' , B' e C' - anteparos

b - Fator que define a curvatura do espelho

C^* - constante pré-integral

C - Cubo divisor de Feixe

d - Distância entre os feixes de luz

d' - distância entre as fendas

d_{hkl} - espaçamento interplanar

D - distância entre os anteparos

D' - Diâmetro da lente ou espelho

EP - Espelho plano

E_0 - campo elétrico inicial

e' - a espessura do espelho

F - Ponto focal pela óptica geométrica

F_1 , F_2 e F_3 - pontos focais do interferômetro

h - Raio de abertura do espelho

h , k e l - índices de Miller

I_0 - é a máxima intensidade dada no centro do disco do padrão de Airy

J - função de Bessel

K' - número de ondas

K , L e M - níveis de energia

LA - *Laser*

L - Lente biconvexa

O - Conjunto das lentes da ocular de 20 mm

P - Pico na superfície do espelho

$P(\theta)$ - energia incidente no padrão de Airy

Q - Polinômio de ordem $2(n - m) \cdot Q_n^m(\rho)$

r_1 e r_2 - caminhos percorridos pela frente de onda

R - Raio do centro de curvatura

S_0 , S_1 e S_2 - fendas onde ocorrem a difração

t - tempo

T_f - Temperatura de fusão

T_g - Faixa de transição vítrea

U (P) - difração sofrida por fenda circular

V - vale na superfície do espelho

W - *webcam*

w - Frente de onda plana

w' - Frente de onda esférica

XYZ - coordenadas em 3 dimensões

β - índice de dilatação superficial

δ - Tamanho dos picos ou vales na superfície do espelho

ΔA - variação da área

Δp - região focal de espelhos parabólicos refletindo frente de ondas esféricas

ΔT - variação de temperatura

$\overline{\Delta W}$ - média dos erros na frente de onda refletida pelo espelho

θ - Ângulo entre as ondas

λ - Comprimento da onda

σ - qualidade da frente de onda

ϕ - diferença de fase entre as ondas

ψ é o ângulo entre w e X

- frequência angular de uma onda eletromagnética

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	18
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 - Propriedades dos Vidros	20
2.2 - Evolução dos testes ópticos para espelhos de telescópios	26
2.3 -Difração e interferometria pela óptica geométrica	28
2.4 -Difração e interferometria em abertura circular pela óptica física	30
2.5 - Frente de Onda	34
2.6 - Polinômios de Zernike	35
2.7 - Fator Strehl	38
2.8 - Curvatura dos espelhos	39
3 - MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1 - Interferômetro de Bath	42
3.2 - Análise computacional	62
3.3 - Metodologia para análise da superfície	64
3.4 - Medidas de Interferometria	65
3.5 - Análise Química	70
3.6 - Análise Estrutural	71
4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
4.1 - Medidas de Interferometria em função da variação da temperatura	75
4.2 - Medidas de interferometria com estabilização da temperatura	85
4.3 - Medidas de interferometria para espelhos mantidos na posição vertical	86
4.4 – Deformações devido ao peso do espelho	88
4.5 - Composição Química e Estrutura	96
5 - CONCLUSÕES	97
6 - REFERÊNCIAS	99
Anexo 1	103

1. Introdução

Os vidros são divididos em duas principais categorias: naturais e artificiais. Os naturais existem desde a consolidação da crosta terrestre e, com isso, o vidro não dá nome a nenhum período histórico, pois, existiu em todos eles [1].

A aparição dos primeiros objetos feitos de vidro artificial não pode ser situada geograficamente nem cronologicamente. O descobrimento e domínio do fogo deram ao homem acesso a altas temperaturas e com isso o desenvolvimento dos primeiros vidros artificiais. A fabricação dos primeiros vidros era realizada de maneira empírica, não existia um controle rigoroso em sua fabricação e nem conhecimento químico das suas reações, gerando primeiramente vidros coloridos e opacos. Os métodos para purificar vidros tiveram início aproximadamente em 1450 d.C. Ângelo Barovier retirando as impurezas da composição obteve o Cristalino [2]. Com a necessidade de diminuir a quantidade de madeira utilizada nos fornos de fabricação de vidro, foi adicionado chumbo para diminuir a temperatura de trabalho do vidro e, por consequência, gerou um vidro de maior brilho, conhecido como Cristais da Bohemia [1, 2].

A evolução da composição dos vidros no século XVII provocou também a evolução da ciência, uma vez que com vidros cada vez mais transparentes foi possível a invenção dos instrumentos ópticos [3]. Especificamente, para a construção de espelhos de telescópios dois tipos de vidros são mais utilizados [4]: o vidro Soda-Cálcico (Soda-Lime), largamente utilizado na América Latina, e o vidro Boro-silicato (Pirex), mais utilizado nos EUA. Como os dois vidros possuem diferentes composições químicas, suas propriedades físicas também são diferentes.

Espelhos de alta precisão, como os usados em telescópios, sofrem diversos tipos de defeitos prejudicando as imagens geradas, alguns estão relacionados com o uso cotidiano, alguns devido ao efeito da gravidade e efeitos térmicos como a variação de temperatura durante o dia. Esses fenômenos físicos podem fazer com que a superfície do espelho deforme de maneira significativa, fazendo com que esse se transforme em um espelho com baixa qualidade óptica.

O trabalho desenvolvido visa a comparação entre os dois materiais e avaliar o desempenho de ambos com situações de uso semelhantes as sofridas durante sua utilização. Para realizar este estudo foi montado um interferômetro de Bath, com posterior análise de resultados obtidos com a utilização do mesmo, relacionando as franjas de interferência com os polinômios de Zernike, utilizando programas computacionais.

No capítulo 2 é realizada uma introdução e revisão bibliográfica sobre os principais conceitos envolvidos na técnica de avaliação e análise das amostras utilizadas neste trabalho. São mostradas as principais características dos materiais vítreos como estrutura, transição vítrea, composição química, dilatação térmica e elasticidade dos vidros. Os princípios de interferometria, a evolução dos estudos e sua utilização para correção de defeitos em instrumentos astronômicos, a evolução dos testes com a invenção do laser e a popularização dos interferômetros também são abordados. São apresentados os polinômios de Zernike utilizados para interpretação da frente de onda gerada com a utilização do interferômetro e sua associação com as aberrações nos espelhos primários de telescópios. Completando o capítulo, os fatores que determinam a qualidade óptica dos espelhos como deformações na frente de onda, Fator Strehl baseado na distorção da frente de onda e curvatura dos espelhos são abordados.

No capítulo 3 é discutido o modelo utilizado para a construção do interferômetro de Bath, como é realizado seu alinhamento, quais são os possíveis defeitos que o interferômetro pode apresentar devido a falta de alinhamento dos componentes ópticos e quais são as soluções encontradas para os problemas enfrentados em sua montagem. Mostramos também como são utilizadas as franjas de interferometria captadas e como realizar a comparação com franjas padrões para identificação de defeitos na frente de onda, calculando o astigmatismo gerado pela própria montagem do interferômetro. A utilização de *software* para interpretação das franjas de interferometria, criação das imagens 3D e o mapa de relevo das superfícies dos espelhos analisados serão apresentados neste capítulo. Apresentamos também as condições que foram realizadas as medidas dos três espelhos primários de telescópios newtonianos, sendo dois artesanais e um fabricado por empresa especializada.

Os resultados são apresentados no capítulo 4, onde são discutidos o comportamento dos espelhos com a variação da temperatura no ambiente do laboratório, com a

temperatura fixa (estável) e com diferentes tempos de exposição a temperatura de 16°C. Investigamos ainda os efeitos causados nos espelhos quando apoiados na vertical com seu eixo óptico na horizontal e quando os espelhos sofrem a ação de seu próprio peso quando apoiados apenas por dois pontos da sua borda.

As conclusões obtidas são apresentadas no capítulo 5.

O objetivo principal do trabalho é gerar estudos para a obtenção de novos equipamentos de interferometria de baixo custo para os laboratórios da UNESP campus de Bauru. O trabalho também tem como objetivo contribuir para a pesquisa em materiais comparando o desempenho dos principais materiais vítreos utilizados na construção de espelhos primários de telescópios e quais seus comportamentos diante de situações cotidianas que podem gerar defeitos na curvatura de sua superfície e conseqüentemente afetar a qualidade óptica.

2. Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta os principais conceitos sobre vidros, suas propriedades estruturais e mecânicas. São também abordados conceitos de óptica como frente de onda, interferometria e a evolução dos métodos de medidas e qualidade óptica.

2.1 Propriedades dos Vidros

O vidro vem sendo utilizado como base para a superfície refletora de telescópios desde que Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868) conseguiu realizar o processo de prateamento com qualidade óptica, resolvendo um dos maiores problemas na construção

dos equipamentos: o constante polimento devido a oxidação do *speculum*, liga metálica feita com 66% de cobre e 34% de uma liga de estanho branco, muito utilizado na construção dos primeiros telescópios [3]. O vidro foi utilizado como base para espelhos de telescópios devido as suas propriedades físicas, por possuir uma boa estabilidade química, resistência a impactos, menor densidade e menor índice de dilatação comparado aos metais, o que proporciona uma boa estabilidade térmica.

Os vidros possuem um comportamento bem diferente dos materiais cristalinos, abrangendo algumas propriedades de líquidos, como possuir estrutura amorfa, como mostra a figura 1.

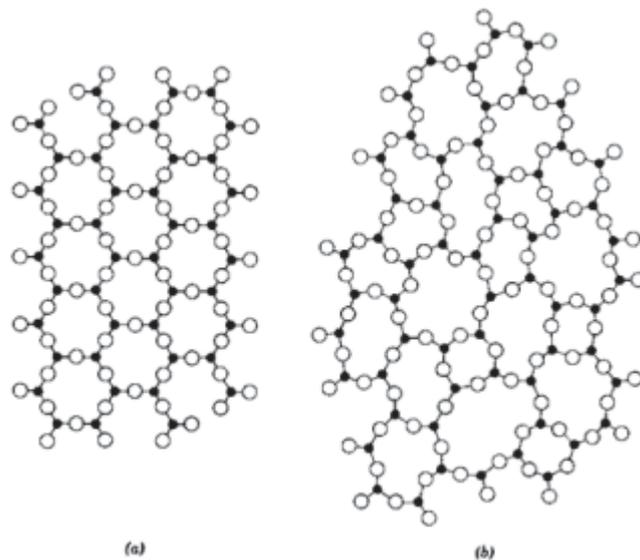


Figura 1 – Diferença esquemática entre estrutura de um sólido cristalino (a) e amorfo (b) [5].

Entretanto, apresenta dureza e viscosidade semelhantes aos sólidos. A discrepância entre a estrutura semelhante à de líquidos e as propriedades semelhantes aos sólidos, é devido a um comportamento bem particular de alguns materiais, a transição vítrea.

Para demonstrar o que é a transição vítrea, é utilizado um gráfico na figura 2 de volume *versus* temperatura e comparada a diferença entre o comportamento de materiais cristalinos e materiais que possuem transição vítrea.

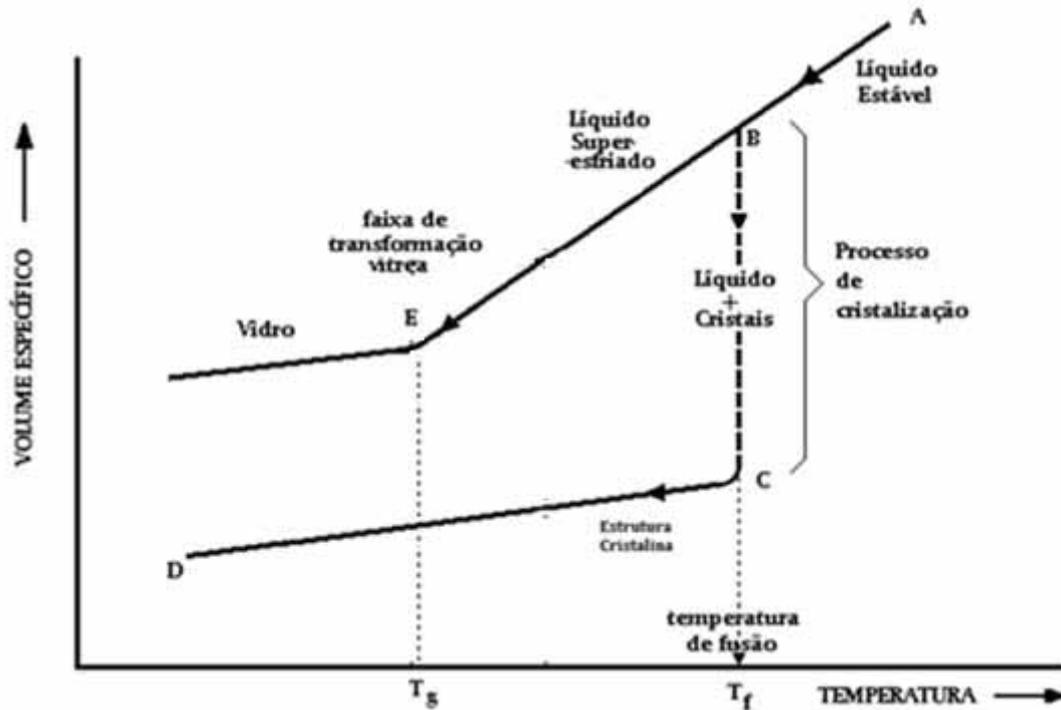


Figura 2 - Variação do volume de materiais cristalino e amorfo em função da temperatura [5].

Quando o material estiver no ponto A, está no estado líquido; à medida que é resfriado e segue em direção ao ponto B, seguindo o caminho B-C, com temperatura constante e volume cada vez menor, a agitação dos átomos será menor. A temperatura estabiliza ocorrendo um aumento de densidade e os átomos que antes estavam livres, passam a ocupar posições fixas, ou seja, ordenam-se formando uma estrutura cristalina (arranjos ordenados de átomos que se repetem regularmente).

Com o término da cristalização da estrutura do material no ponto C, ele volta a se resfriar seguindo o caminho C-D. A inclinação dessa reta é menor do que a A-B devido ao grau de liberdade de movimentação na estrutura cristalina ser menor do que no estado líquido, portando o coeficiente de expansão térmico é menor.

Se o resfriamento do *líquido estável* for feito rapidamente, não havendo tempo para que os átomos formem uma estrutura cristalina (caminho B-E), o material se encontrará no estado de um *líquido superesfriado*, onde a redução de volume ocorre apenas devido a diminuição da movimentação térmica das moléculas; entretanto, à medida que o material é resfriado sua viscosidade aumenta, dificultando ainda mais a movimentação das moléculas e a partir do ponto E, a viscosidade é tão alta a ponto de impossibilitar o processo de

cristalização da estrutura. Com o resfriamento do material a partir de E, embora o vidro continue com as características de um líquido, com seus átomos sem arranjo estrutural definido, seu comportamento passa a ser semelhante ao dos sólidos cristalinos, tais como rigidez, dureza, dilatação térmica, entre outros. A região próxima a E é chamada de faixa de transição vítrea (T_g), e pode assumir vários valores dependendo da velocidade de resfriamento, cada composição de química de vidro possui uma diferente faixa de transição vítrea. Ela separa o comportamento do material entre líquido e sólido, porém sem haver a cristalização na estrutura do material [5].

As diversas propriedades físicas dos vidros vêm de suas diferentes composições químicas e a figura 3 exemplifica de maneira qualitativa o comportamento do vidro dependendo dos óxidos que são adicionados em sua composição. Devido a essa diferença química na estrutura dos vidros, os espelhos formados com Boro-silicatos e Soda-Cálcicos, possuem diferentes comportamentos aos efeitos físicos, como temperatura e a ao efeito da gravidade.

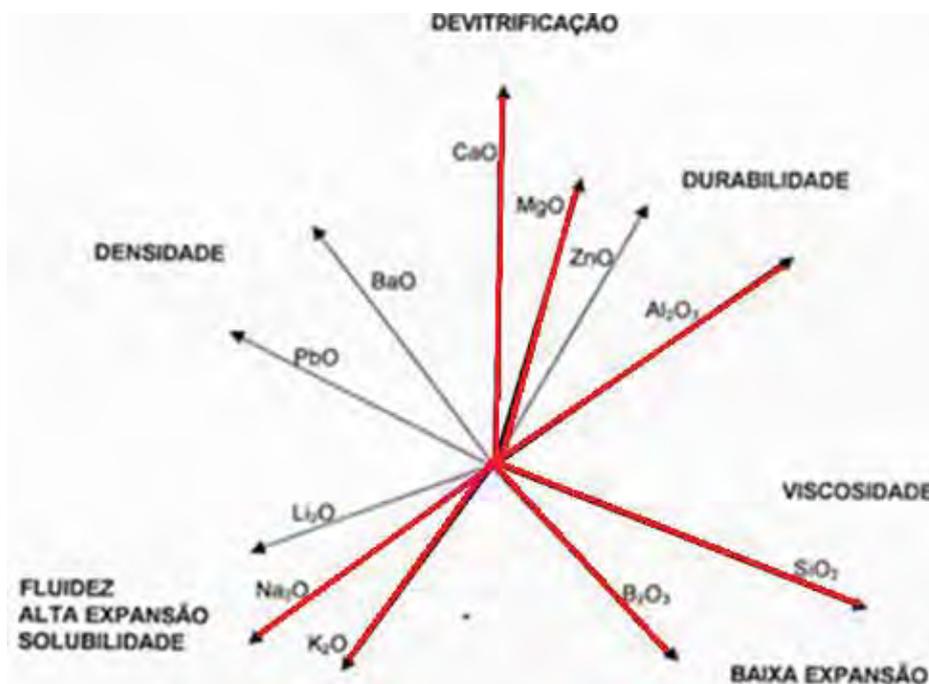


Figura 3 – Diagrama dos efeitos causados pela adição de óxidos no vidro, os óxidos em destaque são os óxidos utilizados na composição dos vidros analisados. Figura adaptada [5].

Na literatura a diferença da composição química dos vidros Sodo – Cálculos e Boro-Silicatos são resumidas na tabela 1, sendo que a composição pode sofrer uma pequena variação dependendo do fabricante.

Tabela 1 – Composição química dos vidros em % de massa [1,2 e 5]

Vidros (nomes comerciais)		SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO
Sodo-cálculos	Plano	71,0%	1,0%	-	13,5%	0,5%	10,0%	4,0%
Boro-silicato	Pyrex	79,5%	2,0%	13,0%	5,5%	-	-	-

Em função da maior quantidade de formadores de rede (SiO₂ e B₂O₃) e menor quantidade de óxidos modificadores de rede (Na₂O, K₂O, CaO e MgO), os vidros Boro-silicato possuem uma boa resistência ao choque térmico, menor índice de dilatação e resistência ao ataque químico [1]. Em função disso, é considerado melhor vidro para construção artesanal de espelhos côncavos de precisão com médio porte (até 25 cm de diâmetro). Entretanto, mesmo sendo mais estável, o boro-silicato sofre deformações na superfície devido a dilatação térmica, que pode ser acentuada devido à camada refletora de alumínio depositada na superfície do vidro através da vaporização [6], como a alumínio possui um índice de dilatação superficial acima do vidro a somatória da dilatação das superfícies pode forçar uma deformação como exemplificado na figura 4.



Figura 4 – Efeitos da diferença de dilatação térmica entre o vidro e o alumínio

Onde T_0 é a temperatura de aluminização do vidro. A dilatação da área da superfície [7, 8, 9] do espelho é dada pela relação 1:

$$\Delta A = A_0 \cdot \beta \cdot \Delta T \quad (1)$$

Onde ΔA é a variação da área, A_0 é a área inicial, β é o índice de dilatação superficial e ΔT é a variação de temperatura [7,8,9]. A tabela 2 mostra os índices de dilatação linear do vidro Boro-silicato, Soda-cálcico e do alumínio.

Tabela 2 – Índice de dilatação superficial [7].

Materiais	Índice de dilatação superficial β
Vidro Boro-silicato	$64 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Vidro Sodo-cálcico	$170 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Alumínio	$460 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Como a variação da temperatura ocasiona em deformação mecânica da superfície do vidro a dureza dos materiais vitreos podem amenizar essas deformações, como a dureza do sistema boro-silicato (~5,7 Mohs) e do sistema soda-cálcico (~6 Mohs) são maiores que do alumínio (~2.75 Mohs), mesmo com a grande diferença entre os índices de dilatação dos materiais, as deformações podem ser amenizadas [1]. Outro fator que pode influenciar na deformação da superfície do espelho, em ambiente com variação de temperatura é o gradiente de temperatura do vidro, devido a sua espessura, como o vidro é um isolante termico, a temperatura interna do espelho e superficial são diferentes, forçando a superfície do vidro e provocando deformações.

Devido a esses comportamentos, o ambiente onde o espelho permanece deve possuir uma temperatura estável, até mesmo a variação da temperatura durante o dia faz com que a superfície do espelho sofra grandes deformações, transformando um telescópio com boa qualidade optica em um equipamento inutilizável.

A gravidade também pode influenciar no aparecimento de deformações devido a deformação elástica do vidro [4]. Essa deformação sofrida pelos espelhos foi aferida apenas com a deformação na frente de onda refletida pelo espelho, captada no interferômetro construído no trabalho.

2.2 Evolução dos testes ópticos para espelhos de telescópios

Desde a criação do primeiro telescópio refletor em 1663, obtido por James Gregory (1638-1675), diversas tentativas foram realizadas para analisar a qualidade óptica dos equipamentos [3]. Entretanto, apenas em 1721, John Hadley (1682-1744), utilizando uma fonte de luz no centro de curvatura do espelho, conseguiu realizar o primeiro teste óptico para telescópios com êxito. Esse método foi posteriormente aperfeiçoado por Jean-Bernard-Léon Foucault, e ficou conhecido como teste de Foucault (detalhes sobre o teste de Foucault no Anexo 1) [4, 10]. Através desse teste é possível a visualização do relevo da superfície e análise da qualidade óptica da mesma, como pode ser visto na figura 5, com o teste realizado durante o polimento para obtenção do espelho.



Figura 5 – Imagem do espelho analisado, na etapa de polimento, utilizando teste de Foucault.

Embora o teste de Foucault tenha um bom resultado para análise da superfície de espelhos, com identificação de defeitos na superfície de até 10 nanômetros, para chegar a essa precisão na interpretação é necessário anos de experiência. A difícil interpretação de pequenos defeitos na superfície para iniciantes e a detecção apenas dos principais defeitos ópticos como rugosidade da superfície, astigmatismo, coma, aberração esférica, entre

outros, o transforma em um teste difícil de ser utilizado no trabalho, justificando a construção do interferômetro de Bath, sendo um equipamento mais simples na interpretação dos resultados gerados nas medidas.

Com apresentação da teoria ondulatória para a luz feita por Christian Huygens (1629 – 1695) em 1678 e provada experimentalmente em 1801 por Thomaz Young (1773 – 1829) pelo experimento das fendas de Young, discutida com detalhes no capítulo 2.3, tornou-se possível calcular o comprimento de onda da luz através da interferometria [11, 12, 13]. Isso permitiu que George Biddell Airy (1801-1892), analisasse e discutisse o fenômeno de difração em fendas circulares através da teoria ondulatória, posteriormente denominada como padrão de Airy, que será discutida com detalhes no capítulo 2.4 [4]. Entretanto, o experimento que alavancou essa nova frente de estudos foi o Interferômetro de Michelson-Morley [14] que, devido a sua grande sensibilidade, tornou possível aumentar a precisão da determinação dos caminhos ópticos da interferometria.

Com a construção do primeiro *laser* [15] em 1960 por Theodore Harold Maiman (1927–2007), os métodos de medidas de precisão avançaram abruptamente, abrindo uma ampla utilização de interferômetros na indústria, para analisar sensibilidade de equipamentos, vibrações e determinar formas das superfícies, entre outras aplicações. Entre essas aplicações foram encontrados diversos métodos para aferir com precisão a superfície de equipamentos ópticos. Um desses métodos com alto desempenho e baixo custo é o interferômetro de Bath, criado em 1973 por Karl-Ludwing Bath [16], analisando a curvatura de espelhos côncavos com precisão de nanômetros. Outro grande avanço que deixou mais acessível à construção de interferômetros foi a criação de *lasers* mais acessíveis com menor custo, para a interpretação das franjas de interferometria foram utilizados *softwares* que ajudam a calcular a frente de onda através dos polinômios de Zernike e transformar em superfícies 3D conforme será discutido no capítulo 3.

2.3 Difração e interferometria pela óptica geométrica

A difração ocorre quando uma onda encontra um obstáculo com uma fenda, de abertura comparável ao comprimento de onda. A onda passa pelo orifício e é difratada, quanto menor a fenda maior é o efeito de difração observado. Esse fenômeno ocorre seguindo o princípio de Huygens-Fresnel [11,12, 13].

Em 1801 através do experimento de fendas de Young foi possível provar que a luz é uma onda e calcular o comprimento de onda média solar em 570 nm, através do experimento de difração em fendas duplas esquematizado na figura 6.

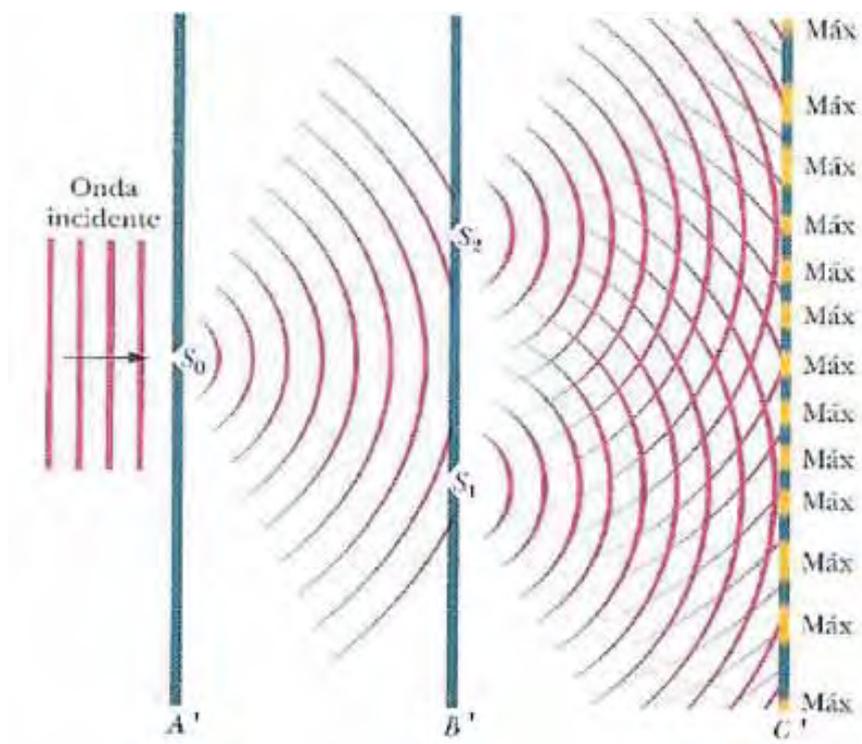


Figura 6 – Configuração do teste de fendas de Young [11].

A frente de onda incide no anteparo A' e é difratada pela fenda S_0 , posteriormente encontrando as fendas S_1 e S_2 no anteparo B', uma nova difração ocorre, as duas frentes de ondas criadas interagem através da interferometria, como pode ser observado no anteparo C', sendo as regiões em amarelo com interferência construtiva e em azul destrutiva [11].

As franjas de interferometria destrutiva são formadas devido à somatória de duas ondas que não estão em fase por meio comprimento de onda, têm a mínima intensidade luminosa e formam franjas escuras de interferometria. Quando as ondas estão em fase, sua interferência é construtiva e apresenta o máximo de intensidade.

Para determinar se em um ponto específico P ocorrerá interferência construtiva ou destrutiva, é necessário determinar a diferença de fase entre as duas ondas r_1 e r_2 , devido a diferença de caminho percorrido pelas ondas, exemplificado na figura 7.

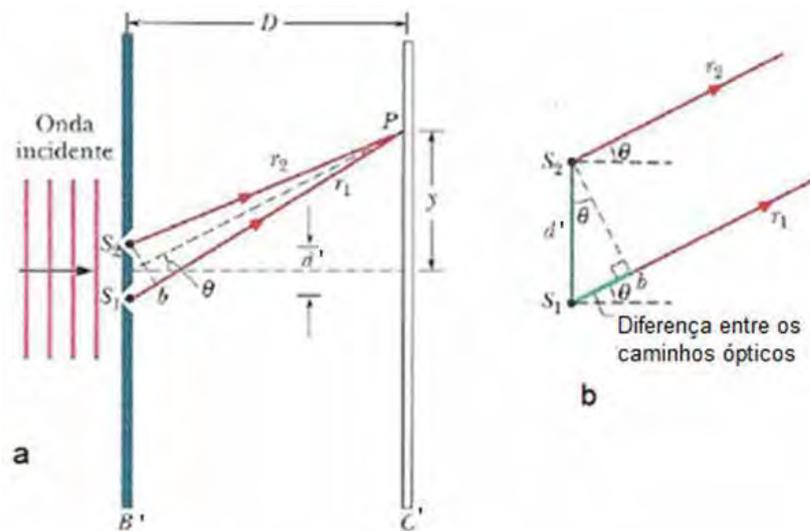


Figura 7 – Diferença entre caminhos ótricos percorridos pelas ondas r_1 e r_2 [11].

Para determinar a intensidade luminosa no ponto P, primeiramente devemos determinar o campo elétrico de cada onda r_1 e r_2 sendo dada pelas relações 2 e 3 [11, 12, 13].

$$E_1 = E_0 \text{sen } \omega t \quad (2)$$

$$E_2 = E_0 \text{sen}(\omega t + \phi) \quad (3)$$

Onde ω é a frequência angular, ϕ diferença de fase e E_0 campo elétrico inicial, sendo o mesmo para as duas ondas e t o tempo. Através da soma vetorial de fasores na equação 2 e 3 obtemos a relação 4, sendo a amplitude do campo elétrico no ponto P [11].

$$E = 2E_0 \cos \frac{1}{2} \phi \quad (4)$$

Como a intensidade é dada por $I = E^2$ elevando os dois lados da equação 4 ao quadrado obtemos.

$$I = 4I_0 \cos^2 \frac{1}{2} \phi \quad (5)$$

Onde I_0 é a intensidade luminosa inicial [11], e ϕ é dado pela relação 6.

$$\phi = \frac{2\pi d \sin \theta}{\lambda} \quad (6)$$

Onde d é a distância entre as fendas, λ é o comprimento da onda utilizada e θ o ângulo entre as ondas, sendo 0° quando as ondas estiverem em fase e 180° quando elas estiverem com interferência destrutiva, fora de fase em meio comprimento de onda [12].

2.4 Difração e interferometria em abertura circular

Através da óptica geométrica uma lente perfeita, faz com que uma frente de onda plana, se transforme em uma frente de onda esférica com um ponto focal perfeito em F [11,12,13] como mostra a figura 8.

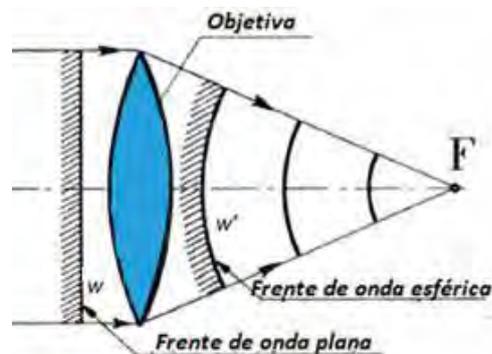


Figura 8 – Ponto focal gerado por uma lente perfeita através da óptica geométrica [4].

Entretanto, isso não acontece na prática, uma vez que pela óptica física é formado um disco central luminoso e em torno dele anéis de menor brilho denominado como padrão de Airy [17]. Esse comportamento pode ser explicado através da teoria de difração feita por Joseph von Fraunhofer (1787 - 1826), aplicada para fenda circular [17].

Através das coordenadas polares (θ, ρ) , é possível determinar a difração sofrida em um ponto P da frente de onda por uma fenda circular [17], através da relação 7.

$$U(P) = C \int_0^{a'} \int_0^{2\pi} e^{-ik\rho w \cos(\theta-\psi)} \rho \, d\rho \, d\theta \quad (7)$$

Onde C é a constante pré-integral, a' é o raio de abertura da fenda, $k' = 2\pi/\lambda$ sendo o número de ondas e ψ é o ângulo entre w e X, como pode ser visto na figura 9.

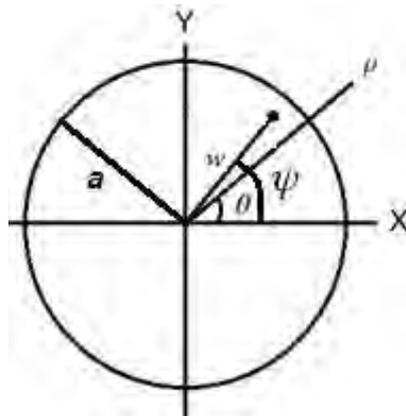


Figura 9 – Coordenadas polares na fenda de abertura circular.

Através da função de Bessel (J_0) [17] a relação 7 reduz-se a

$$U(P) = 2\pi C \int_0^{a'} J_0(k\rho w) \rho \, d\rho \quad (8)$$

Resolvendo a integral da relação 8 e elevando os dois lados ao quadrado, é determinada a relação de intensidade dada por.

$$I(P) = |U(P)|^2 = \left[\frac{2J_1(kaw)}{kaw} \right]^2 I_0 \quad (9)$$

Onde I_0 é a máxima intensidade dada no centro do disco do padrão de Airy, J_1 é a função de Bessel de primeira ordem.

Para determinar a intensidade na proximidade do disco de Airy [17], podemos simplificar a relação igualando $(k' a w) = x$, quando $x = 0$, estamos no centro do disco de Airy, que possui a maior intensidade luminosa, com $y = 1$, na relação 10.

$$y = \left(\frac{2J(x)}{x} \right)^2 \quad (10)$$

Derivando a relação em função de x e igualando a zero é possível determinar as regiões de máximos e mínimos [17], dados na tabela 3.

Tabela 3 – Intensidade Y do padrão de Airy em relação a distância X do disco central [17].

X	Y	Relação de máximo ou mínimo
0	1	Máximo
1,22 π	0	Mínimo
1,635 π	0,0175	Máximo
2,233 π	0	Mínimo
2,679 π	0,0042	Máximo
3,238 π	0	Mínimo
3,699 π	0,0016	Máximo

Através desse resultado é possível esboçar o gráfico de intensidade luminosa, que oscila entre máximos e mínimos e perde gradualmente sua amplitude como mostra a figura 10.

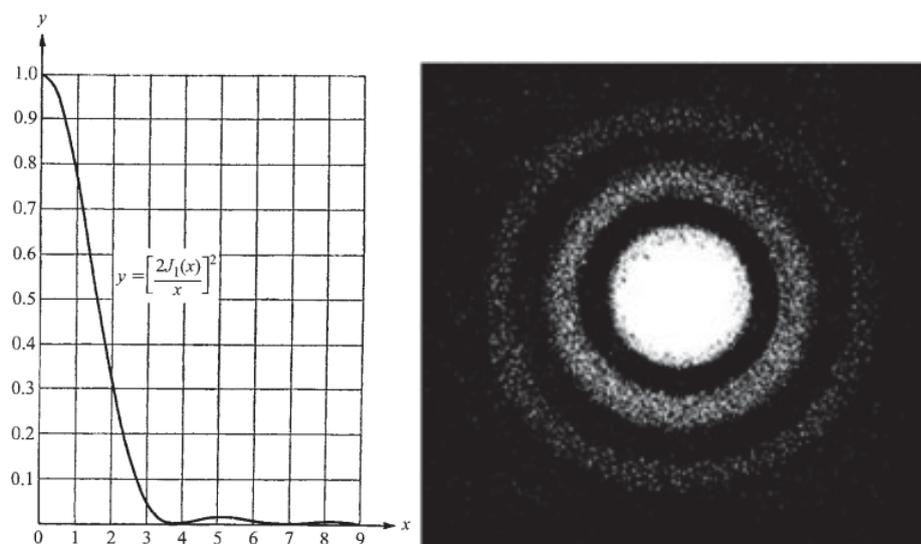


Figura 10 – Intensidade luminosa devido a distância do disco central de Airy. Figura adaptada [4, 17].

Fazendo a integral da relação 9, é obtida a relação total de energia incidente no padrão de Airy [17], dada pela relação 11.

$$P(\theta) = P_0[1 - J_0^2(ka \sin \theta) - J_1^2(ka \sin \theta)] \quad (11)$$

Onde P_0 é o total de energia incidente no centro do padrão de Airy. Através dessa relação Lord Rayleigh (1842-1919) estabeleceu um critério de qualidade, utilizado até hoje na construção de espelhos para telescópios, determinando que o máximo de energia incidente no disco central, que poderia ser perdido em um telescópio com boa qualidade óptica, seria de 20% [17]. Para que ocorra essa perda de energia, são necessários defeitos na frente de onda refletida pelo espelho de $0,144 \mu\text{m}$. Um defeito na superfície do espelho δ gera um erro duas 2δ vezes maior na frente de onda, como pode ser visto na figura 11.

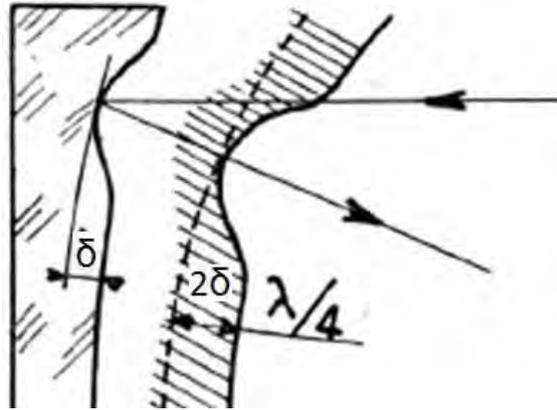


Figura 11 – Defeito na superfície do espelho deformando a frente de onda [4].

Como o defeito na frente de onda não pode ser maior que $0,144 \mu\text{m}$, o defeito na superfície do espelho não pode ser maior que $0,072 \mu\text{m}$ ou $1/8 \lambda$ para luz amarela ($0,576 \mu\text{m}$), como é mais conhecido por construtores amadores de telescópio, sendo estabelecido como critério de qualidade Lord Rayleigh [4, 10], a somatória de todos esses erros locais δ na superfície do espelho é gerada a frente de onda.

2.5 Frente de Onda

Frente de onda é a superfície imaginária que possui a mesma fase em toda a extensão da onda, podendo ser plana ou esférica [12]. Huygens propôs que cada ponto da frente de onda comporta-se como fonte puntiforme, gerando ondas secundárias (ondas esféricas). Para analisar a superfície de um espelho analisaremos as deformações na frente de onda refletida por sua superfície e através dessas deformações determinar os defeitos na superfície do espelho. Essas deformações são geradas por buracos ou morros na superfície do espelhos e são determinados como picos ou vales (P-V) a figura 11 esquematiza um vale.

O fator que mede a somatória de todos os erros criados por P-V na frente de onda refletida pelo espelho é o σ . Esse fator é dado pela média de todos os erros de picos e vales ($\overline{\Delta W}$) na frente de onda [18] e é representado pela equação 12:

$$\sigma^2 = \overline{\Delta W^2} - (\overline{\Delta W})^2 \quad (12)$$

Sendo a média dos desvios de frente de onda ao quadrado menos o quadrado do desvio da frente de onda média. O σ é mais utilizado para especificar a qualidade de frente de onda e seu valor é dado em unidades de comprimento de onda λ (650 nm). Os desvios na frente de onda são detectados através das distorções nas franjas de interferometria, que são formadas devido aos erros na superfície dos espelhos e associando aos polinômios de Zernike é possível mensurar essas aberrações.

2.6 Polinômios de Zernike

Os polinômios de Zernike geram imagens em três dimensões a partir da frente de onda gerada pelos equipamentos ópticos (neste trabalho pelo espelho primário do telescópio) e são amplamente utilizados em óptica para descrever aberrações, conforme desenvolvido por Frits Zernike (1888 – 1966) em 1934. Eles podem ser expressos tanto em coordenadas cartesianas como em coordenadas ortogonais. Como coordenadas ortogonais podem ser expressos em um polinômio radial e ser combinado com uma distribuição de senos e cossenos [18]. A frente de onda gerada pelo espelho é dada pela relação 13.

$$W = \overline{\Delta W} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[A_n Q_n^0(\rho) + \sum_{m=1}^n Q_n^m(\rho) \rho^m (B_{nm} \cos m\theta' + C_{nm} \sin m\theta') \right], \quad (13)$$

Onde $\overline{\Delta W}$ é a média das deformações da frente de onda, A_n , B_{nm} e C_{nm} são coeficientes individuais dos polinômios (Z) [18], Q é um polinômio de ordem $2(n - m)$. $Q_n^m(\rho)$ que podem ser escritos de forma geral como:

$$Q_n^m(\rho) = \sum_{s=0}^{n-m} (-1)^s \frac{(2n - m - s)!}{s!(n - s)!(n - m - s)!} \rho^{2(n-m-s)} \quad (14)$$

Os 36 primeiros polinômios estão expressos na tabela 4.

Tabela 4 – Os 36 polinômios de Zernike [18].

n	m	No.	Polynomial
0	0	0	1
1	1	1	$\rho \cos \theta'$
		2	$\rho \sin \theta'$
	0	3	$2\rho^2 - 1$
2	2	4	$\rho^2 \cos 2\theta'$
		5	$\rho^2 \sin 2\theta'$
	1	6	$(3\rho^2 - 2)\rho \cos \theta'$
		7	$(3\rho^2 - 2)\rho \sin \theta'$
	0	8	$6\rho^4 - 6\rho^2 + 1$
	3	3	9
10			$\rho^3 \sin 3\theta'$
2		11	$(4\rho^2 - 3)\rho^2 \cos 2\theta'$
		12	$(4\rho^2 - 3)\rho^2 \sin 2\theta'$
1		13	$(10\rho^4 - 12\rho^2 + 3)\rho \cos \theta'$
		14	$(10\rho^4 - 12\rho^2 + 3)\rho \sin \theta'$
0		15	$20\rho^6 - 30\rho^4 + 12\rho^2 - 1$
4		4	16
	17		$\rho^4 \sin 4\theta'$
	3	18	$(5\rho^2 - 4)\rho^3 \cos 3\theta'$
		19	$(5\rho^2 - 4)\rho^3 \sin 3\theta'$
	2	20	$(15\rho^4 - 20\rho^2 + 6)\rho^2 \cos 2\theta'$
		21	$(15\rho^4 - 20\rho^2 + 6)\rho^2 \sin 2\theta'$
	1	22	$(35\rho^6 - 60\rho^4 + 30\rho^2 - 4)\rho \cos \theta'$
		23	$(35\rho^6 - 60\rho^4 + 30\rho^2 - 4)\rho \sin \theta'$
	0	24	$70\rho^8 - 140\rho^6 + 90\rho^4 - 20\rho^2 + 1$
	5	5	25
26			$\rho^5 \sin 5\theta'$
4		27	$(6\rho^2 - 5)\rho^4 \cos 4\theta'$
		28	$(6\rho^2 - 5)\rho^4 \sin 4\theta'$
3		29	$(21\rho^4 - 30\rho^2 + 10)\rho^3 \cos 3\theta'$
		30	$(21\rho^4 - 30\rho^2 + 10)\rho^3 \sin 3\theta'$
2		31	$(56\rho^6 - 105\rho^4 + 60\rho^2 - 10)\rho^2 \cos 2\theta'$
		32	$(56\rho^6 - 105\rho^4 + 60\rho^2 - 10)\rho^2 \sin 2\theta'$
1		33	$(126\rho^8 - 280\rho^6 + 210\rho^4 - 60\rho^2 + 5)\rho \cos \theta'$
		34	$(126\rho^8 - 280\rho^6 + 210\rho^4 - 60\rho^2 + 5)\rho \sin \theta'$
0	35	$252\rho^{10} - 630\rho^8 + 560\rho^6 - 210\rho^4 + 30\rho^2 - 1$	
6	0	36	$924\rho^{12} - 2772\rho^{10} + 3150\rho^8 - 1680\rho^6 + 420\rho^4 - 42\rho^2 + 1$

A reprodução em 3D dos 18 primeiros polinômios é mostrada na figura 12.

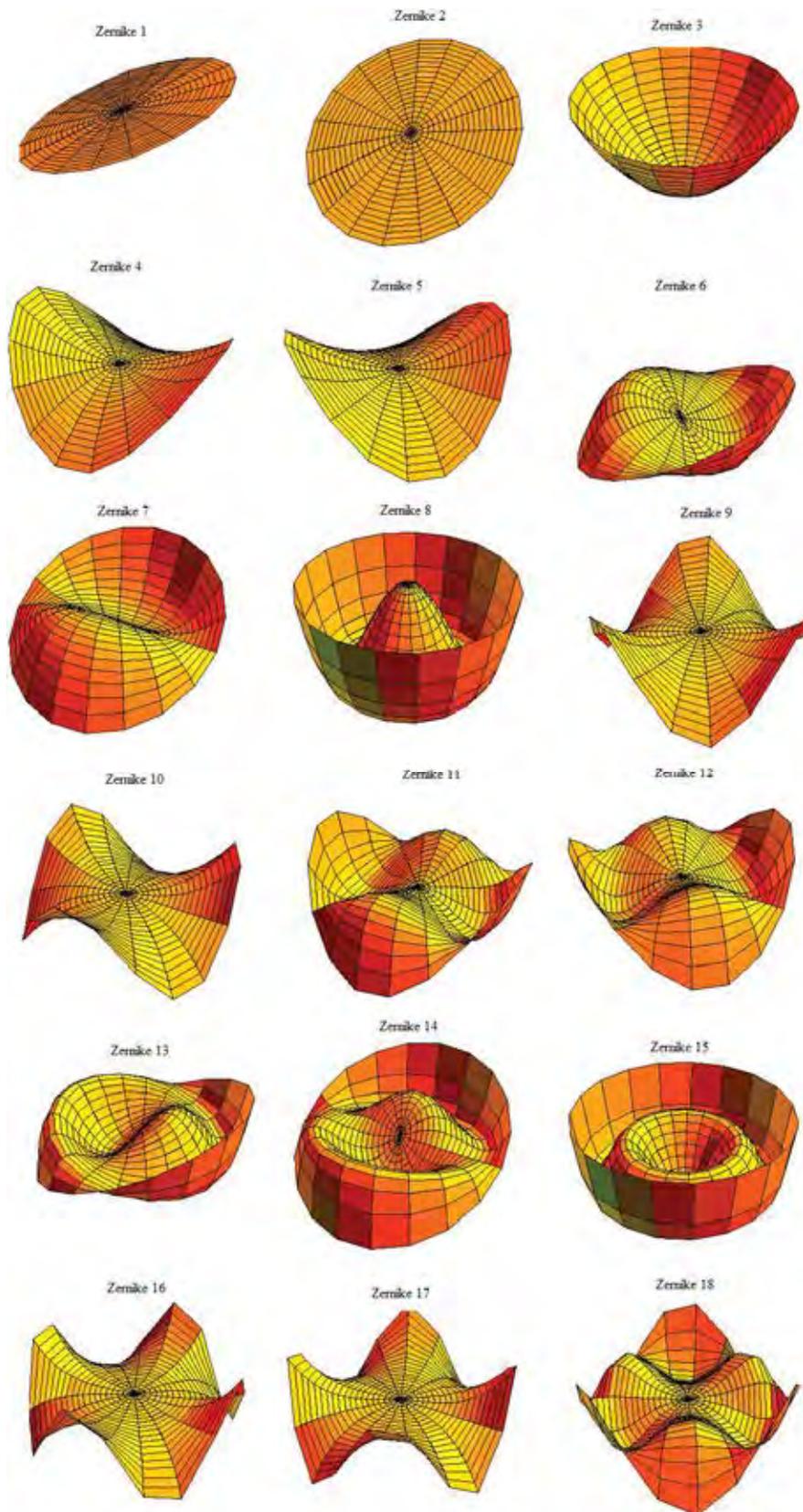


Figura 12 – Superfícies tridimensionais geradas pelos polinômios de Zernike [19].

Associando as franjas de interferometria geradas pela frente de onda com os polinômios de Zernike conseguimos calcular defeitos nanométricos na superfície do espelho. Entretanto, é preciso ter muito cuidado com a sua utilização, pois os polinômios de Zernike não diferenciam os defeitos na frente de onda causados pela atmosfera e os causados pela superfície do espelho.

2.7 Fator Strehl

Desenvolvido por Karl Strehl [18] no final do século 19, o fator Strehl é o mais utilizado para definir a qualidade óptica de espelhos de telescópios profissionais. Esse fator é definido entre 0 e 1, com 1 sendo associado a um telescópio perfeito. O fator Strehl 1 é impossível de ser alcançado devido à difração e obstrução causada por outros componentes do telescópio, entretanto é possível chegar bem próximo a 1 [20]. O fator é baseado no padrão de Airy, relacionando a intensidade luminosa do disco central com a deformação da frente de onda [18], sendo dado por:

$$\text{Strehl} = \frac{1}{\pi^2} \left| \int_0^{2\pi} \int_0^1 e^{i2\pi \Delta W(\rho, \theta)} \rho d\rho d\theta \right|^2, \quad (15)$$

Onde ΔW é média da aberração na frente de onda visto na seção 2.5. A equação de e^x pode ser escrita como uma série infinita [18] da seguinte forma:

$$\text{Strehl} = \frac{1}{\pi^2} \left| \int_0^{2\pi} \int_0^1 [1 + i2\pi \Delta W + \frac{1}{2}(i2\pi \Delta W)^2 + \dots] \rho d\rho d\theta \right|^2 \quad (16)$$

Quando as aberrações forem pequenas, o fator de Strehl [18] pode ser dado pela aproximação.

$$\text{Strehl} \approx e^{-(2\pi\sigma)^2} \approx 1 - (2\pi\sigma)^2 + \frac{(2\pi\sigma)^4}{2!} + \dots, \quad (17)$$

Com a intensidade do Fator Strehl determinada, para avaliar se o espelho possui qualidade óptica ou não, para o espelho ser considerado com pouca deformações na superfície e com uma boa qualidade óptica, o fator Strehl deve ser maior ou igual a 0.8, o que corresponde a um erro de $\sigma \leq 0.071\lambda$.

2.8 Curvatura dos espelhos

Apesar do espelho primário do telescópio ser côncavo nem sempre a sua curva é esférica. Quando a luz proveniente de um objeto muito distante com a frente de onda plana incidir no espelho, se o mesmo possuir curvatura esférica, ele criará aberração esférica na imagem. Para formar uma imagem sem aberração esférica o espelho deverá ter a curvatura próxima à parabólica. Para determinar essa curvatura dos espelhos, coloca-se se uma fonte de luz no centro de curvatura do mesmo, com a frente de onda esférica, a reflexão do espelho esférico possuirá um ponto focal enquanto o espelho parabólico apresentará uma região focal no eixo x denominada como Δp , como mostra a figura 13.

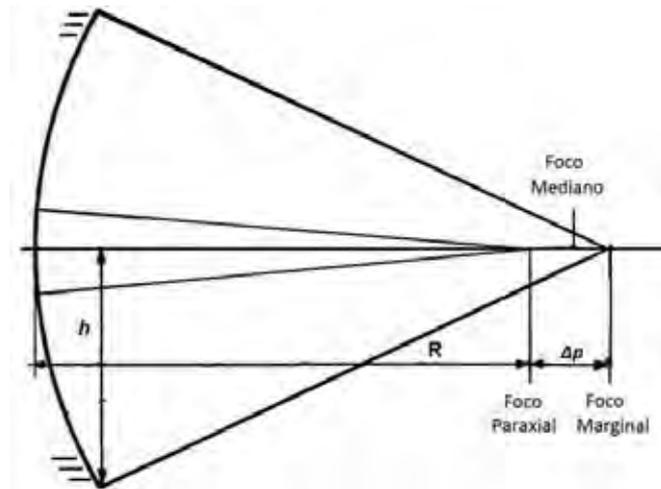


Figura 13 – Formação do Δp causada por uma frente de onda esférica em um espelho parabólico. Figura adaptada [4].

Na figura 13, h é o raio do espelho, R é o raio do centro de curvatura e Δp é zona focal criada pelo espelho parabólico devido a frente de onda esférica.

Essa zona entre o foco paraxial e marginal, gerada pelo espelho não esférico refletindo a frente de onda esférica gerada no centro de curvatura do espelho, pode ser medida através do teste de Foucault, obtendo o valor de Δp , através da relação 18 é determinada a curvatura que o espelho possui [4].

$$\Delta p = b \frac{h^2}{R} + \frac{h^4}{2R^3} \quad (18)$$

Sendo que b define qual a curvatura do espelho: se $b < -1$ o espelho é hiperbólico, $b = -1$ parabólico, $-1 < b < 0$ elíptico, $b = 0$ esférico e $0 < b < 1$ elíptico. São duas condições para o elíptico devido suas duas diferentes curvaturas formadas pelos seus eixos. O fator b será utilizado nas tabelas de análise no capítulo 4. A figura 14 exemplifica a diferença entre as curvaturas no espelho, entretanto, essa diferença na superfície é muito sutil vista apenas na bancada no teste de Foucault.

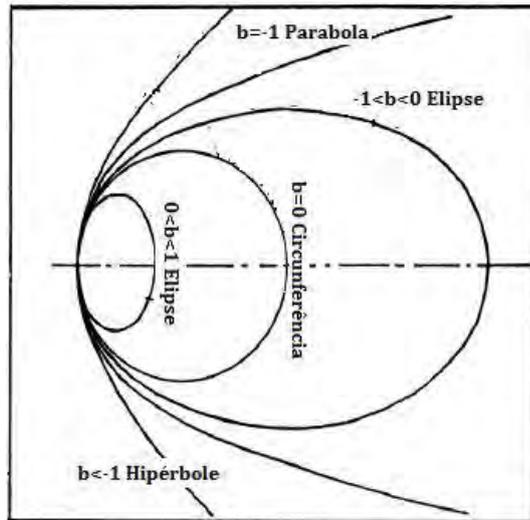


Figura 14 – Representação da curvatura do espelho segundo o valor de b [4].

Com algumas exceções os espelhos podem ser esféricos sem que sua qualidade óptica seja prejudicada, sendo necessário que a distância focal obedeça à relação 19 [4].

$$f^3 \geq 34,9 D'^4 \quad (19)$$

Onde f é a distância focal do espelho em centímetros e D' é seu diâmetro de abertura em centímetros. Se o espelho do telescópio ficar acima dessa relação, a curvatura do espelho poderá ser esférica e ficar dentro dos padrões de qualidade de Lord Raleigh [4].

O teste de Foucault associado a outros métodos para verificação da curvatura e defeitos na superfície podem ser vistos no Anexo 1.

3 Materiais e métodos

Neste trabalho para realizar as medidas das superfícies dos espelhos foi construído um interferômetro de Bath de ângulo reto. O interferômetro é utilizado no final do

polimento de correção dos espelhos, onde os defeitos na superfície são mais difíceis de serem identificados no teste de Foucault. Como no início das correções do espelho, seus defeitos de picos e vales são grandes e facilmente identificados, o interferômetro de Bath não substitui o teste de Foucault e sim complementa com maior detalhe as medidas e análises realizadas. As correções dos espelhos são realizadas através de novas sessões de polimento em regiões específicas, entretanto, dependendo do método utilizado a correção por regiões pode ocasionar defeitos de ondulações na superfície. O teste de Foucault e outras técnicas utilizadas para análise da superfície do espelho utilizando a bancada de Foucault são mostrados no Anexo 1.

Através das franjas de interferometria, a interpretação de defeitos na superfície do espelho se torna mais simples; com auxílio de *softwares* que associam as franjas de interferometria geradas pela superfície dos espelhos aos polinômios de Zernike, é possível encontrar os mínimos defeitos do mesmo e mensurar seus erros, recursos difíceis de serem encontrados para utilização no teste de Foucault.

3.1 Interferômetro de Bath

Quando se estiver realizando medidas com o interferômetro de Bath, todos seus componentes devem se manter fixos como um corpo rígido, para que seu conjunto óptico não seja desalinhado. Devido a essa exigência seus componentes foram montados em uma chapa de alumínio com 4 mm de espessura. Entretanto, todo o conjunto óptico deve possuir movimento nos eixos XYZ e para isso foi montado um suporte de madeira com três plataformas, em que cada plataforma possui movimentos de avanço e recuo em um determinado eixo.

Apesar da madeira não ser o material ideal devido ao seu comportamento em relação a umidade, temperatura e outros fatores; fazendo com que a chapa de alumínio não fique perfeitamente imóvel, como é visto no desalinhamento do interferômetro com o

tempo, é um material barato e facilmente manuseável, para que esse comportamento não interfira nas medidas o interferômetro deve ser alinhado 30 minutos antes do início do trabalho e seu alinhamento verificado antes do início das medidas.

A chapa de alumínio tem dimensões 4 x 125 x 220 mm e foi utilizada como base para os componentes ópticos, onde foram montados e alinhados o cubo divisor de feixe (50% de reflexão 50% transmissão, do fabricante *Edmund Optics*), a lente biconvexa (diâmetro de 6 mm e distância focal de 10 mm), o laser e o espelho plano (espelho plano óptico). Para captação das imagens foi utilizada uma *Webcam* da marca Philips modelo SPC 900 NC PC Câmera. Devido a falta de espaço na chapa de alumínio foi construído um suporte de madeira para a *webcam*. O laser utilizado como fonte luminosa possui o comprimento de onda de 650 nm informado pelo fabricante e para a intensidade luminosa do laser não ultrapassar o limite de sensibilidade da *webcam*, tornando as imagens borradas, foi ligado em série ao circuito elétrico do laser um potenciômetro (resistência variável), para que a intensidade de luz pudesse ser reduzida e captada pela *webcam* sem que a imagem fosse saturada.

Para captação da imagem pela *webcam* foi retirada sua lente original e adicionada duas lentes de uma ocular Plössl 20 mm, separadas 0,5 cm, conforme ilustrada no esquema da figura 15. Essa configuração de lentes foi utilizada para que a imagem inteira da interferometria ficasse com tamanho possível de ser captado pela CCD da *webcam* evitando a captação de apenas partes das franjas.

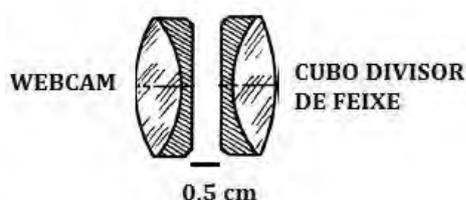


Figura 15 – Configuração utilizada na ocular da *webcam* para captar imagens (Imagem adaptada) [4].

Para edição de imagens e vídeos foi utilizado o programa Philips *VLounge* encontrando gratuitamente no site <http://philips-vlounge.software.informer.com/>. Através desse programa é possível modificar o brilho, contraste, gama, saturação, ganho de luz e

quantidade de *frames* captados por segundo; esses parâmetros auxiliam na melhoria das imagens captadas.

Para interpretação das franjas de interferência foi utilizado o programa *OpenFringe* encontrado no site <http://sourceforge.net/projects/openfringe/> . O programa associa os erros das franjas de interferometria com os polinômios de Zernike, através desse processo é possível construir a imagem do espelho em 3D, com seus parâmetros de qualidade óptica calculados com defeitos da ordem de nanômetros.

Foi utilizada a montagem do equipamento seguindo o modelo proposto por Karl L. Bath em 1973 [16], com pequenas modificações, como utilizar um cubo divisor de feixe ao invés de dois perpendicular ao laser, como mostra a figura 16.

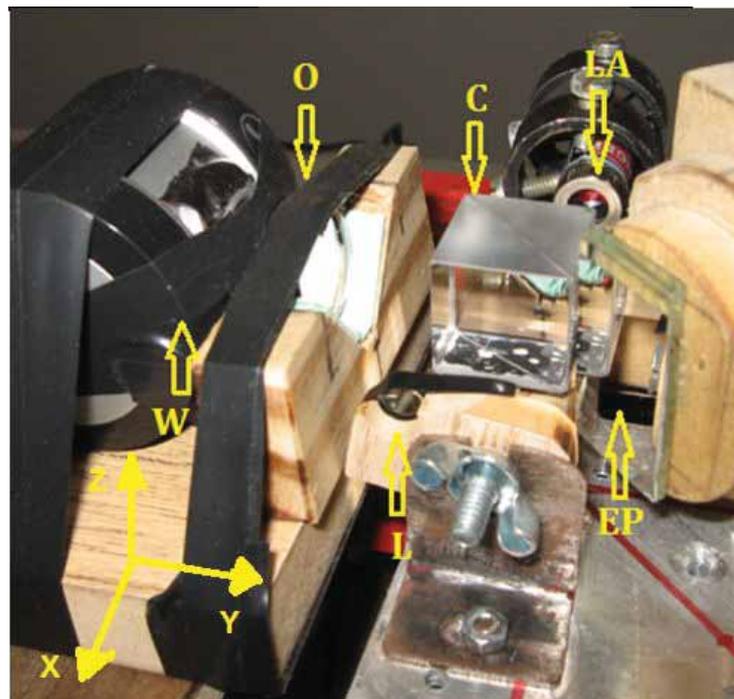


Figura 16 – Interferômetro de Bath montado, sendo O o conjunto das lentes da ocular de 20 mm, C o cubo divisor de Feixe, LA o *laser*, W a *webcam*, L a lente biconvexa e EP o espelho plano.

As figuras 17, 18 e 19 ilustram o funcionamento do interferômetro: o feixe de laser é dividido em C em dois diferentes feixes com mesma intensidade luminosa. O transmitido será chamado de feixe de teste e o refletido será chamado de feixe de referência. Para

facilitar a interpretação dos caminhos ópticos cada feixe será representado separadamente nas figuras 17 e 18.

A figura 17 representa o caminho óptico do feixe de teste, ou seja, 50% do feixe do laser é transmitido, passa por C é refratado por L, formando uma frente de onda esférica e um primeiro ponto focal F1. Parte dessa frente de onda é refletida pelo espelho testado (ET), formando um segundo ponto focal F2 próximo a EP que reflete o feixe para C, onde o feixe novamente é dividido com 50% sendo transmitido e 50% refratado. O refletido segue em direção de LA e não é captado para medidas, seu caminho óptico não foi representado na figura 17. A parte analisada é a transmitida que passa por O e é captada pela *webcam*. Para que isso aconteça o interferômetro deve estar posicionado próximo do centro de curvatura do espelho ao dobro da distância focal do espelho.

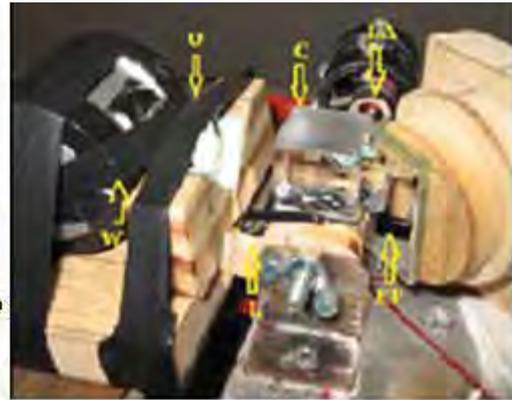
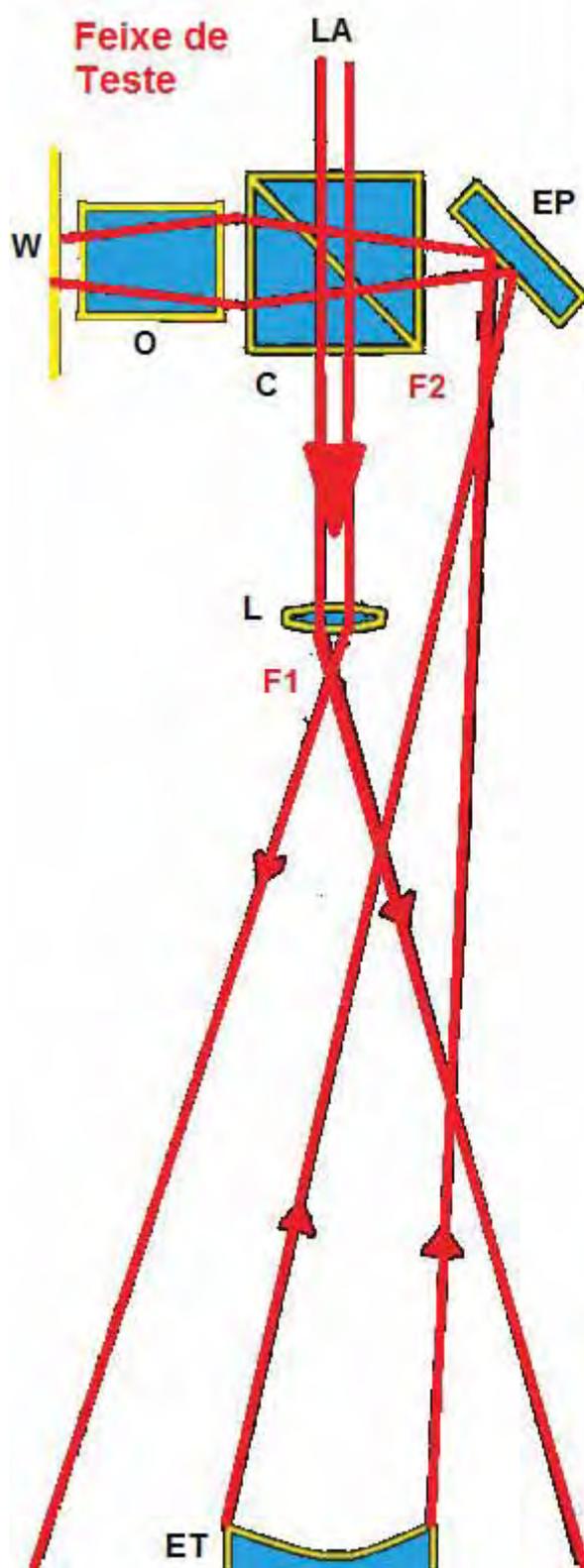


Figura 17 – Caminho do feixe de teste, sendo C o cubo divisor de Feixe, LA o *laser*, O ocular, W a *webcam*, L a lente biconvexa, ET o espelho testado e EP o espelho plano [21].

Na figura 18, o feixe de referência é refletido por C e por EP em direção ao espelho de teste, sendo refletido e passando por L, onde é refratado formando uma frente de onda esférica e um ponto focal em F3, passando por C novamente metade dessa frente de onda é refletida e metade é transmitida. A parte transmitida é descartada, enquanto a parte refletida por C passa por O e é captada pela *webcam*. Segundo o modelo proposto por Bath o feixe de referência é refletido pelo espelho de teste, sem sofrer deformações significativas, devido à pequena área usada na reflexão.

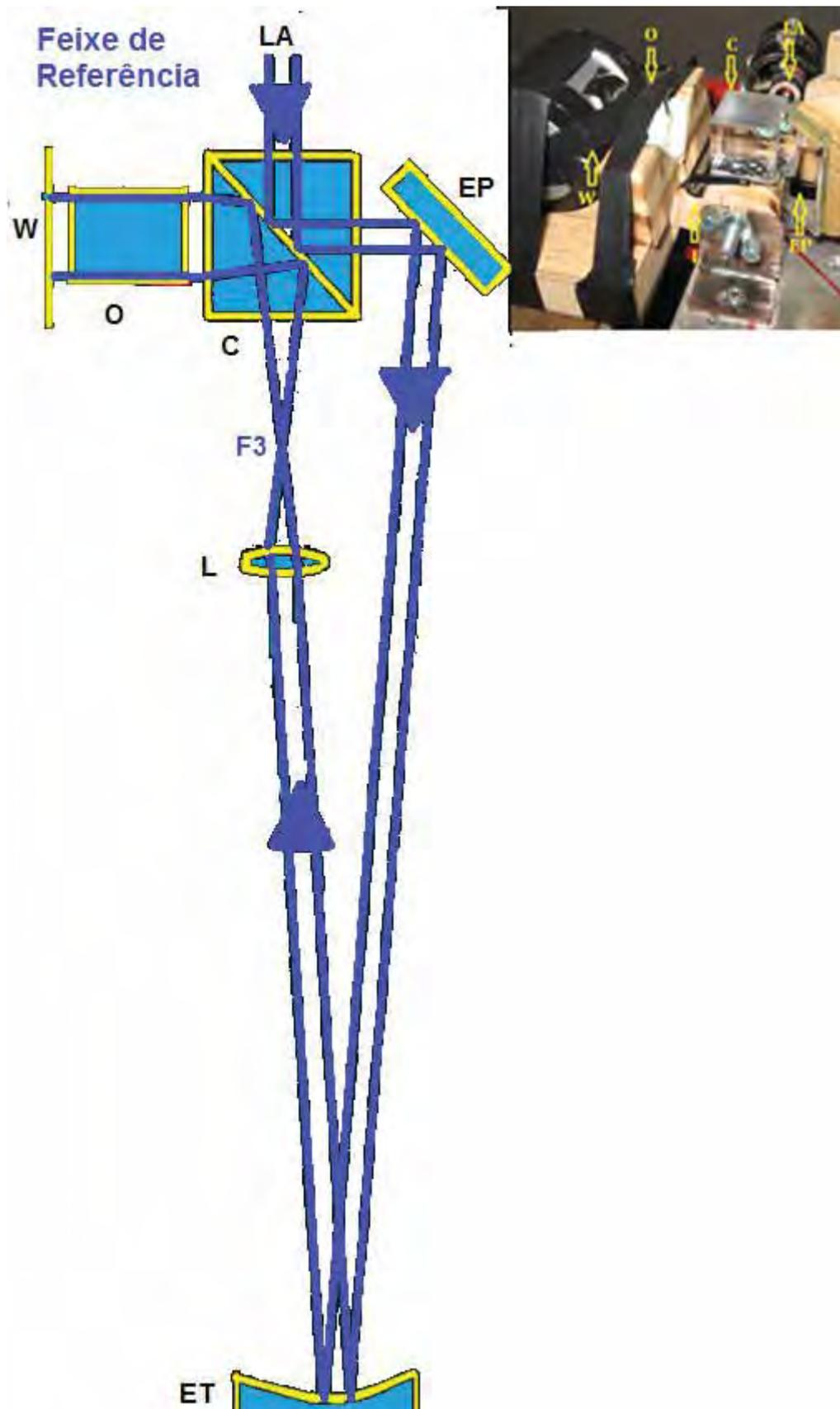


Figura 18 – Caminho do feixede referência, sendo C o cubo divisor de Feixe, LA o *laser*, O ocular, W a *webcam*, L a lente biconvexa e EP o espelho plano (imagem adaptada) [21].

A somatória desses dois feixes geram as franjas de interferência captadas pela *webcam*, como ilustrado na figura 19.

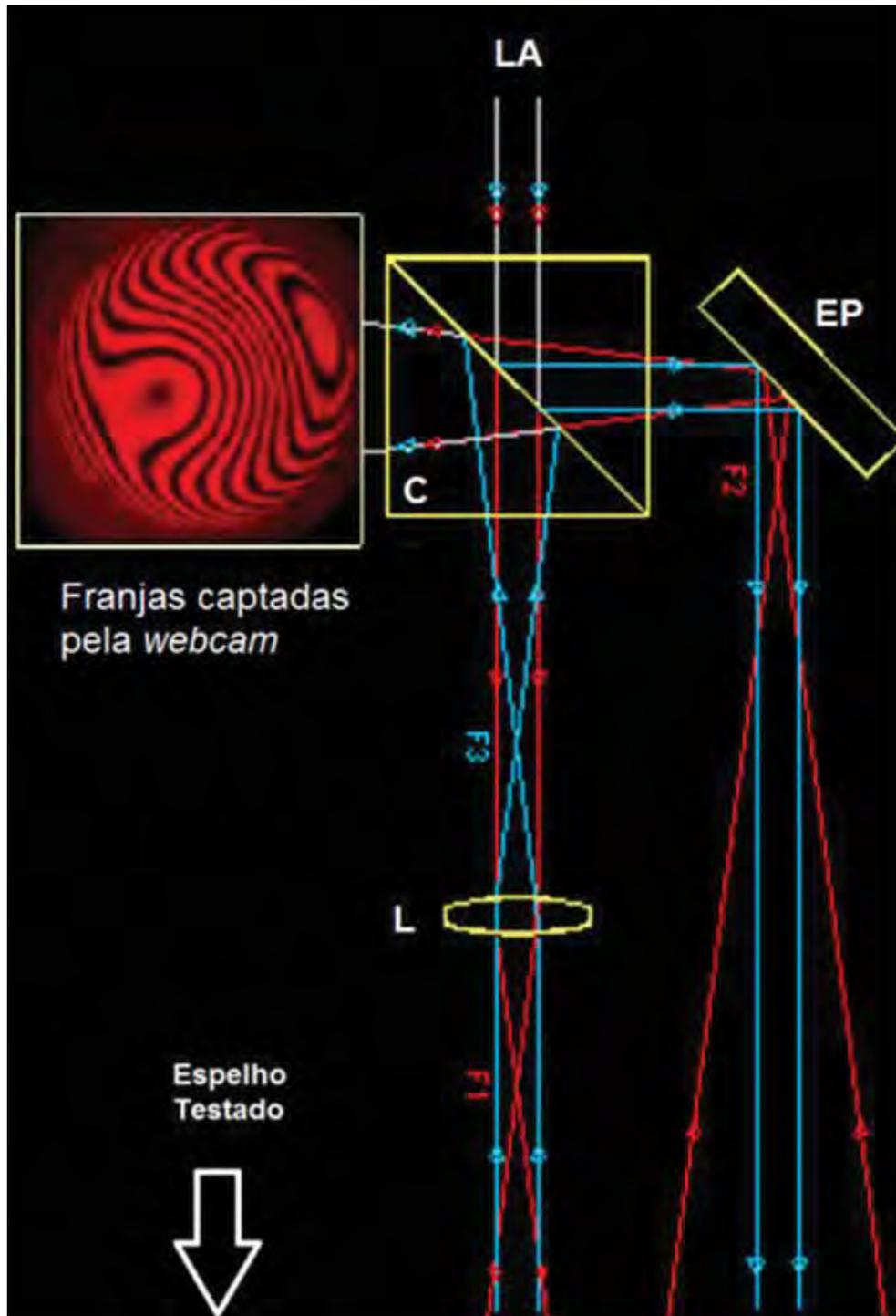


Figura 19 – Esquema representa a somatória dos feixes no interferômetro formando as franjas de interferometria que são analisadas [21].

As primeiras imagens captadas no interferômetro construído no trabalho mostraram alguns defeitos, criados pela falta de alinhamento de alguns componentes devido a utilização de materiais como fita isolante e madeira. Se apenas parte do espelho estiver com nitidez de imagem, como mostra a figura 20 a, aparecendo apenas uma parte do espelho na imagem, o desalinhamento está nas lentes do conjunto da ocular. Outro problema comumente encontrado é a distância entre as lentes oculares, sendo que elas podem estar muito próximas ou afastadas, formando assim imagens sem nitidez como pode ser observado na figura 20 b. Essas são as primeiras fotos tiradas pelo interferômetro montado neste trabalho. As soluções podem ser: alinhar novamente as lentes, modificar a distância entre elas ou trocar as lentes por outras com outras relações de distâncias focais.

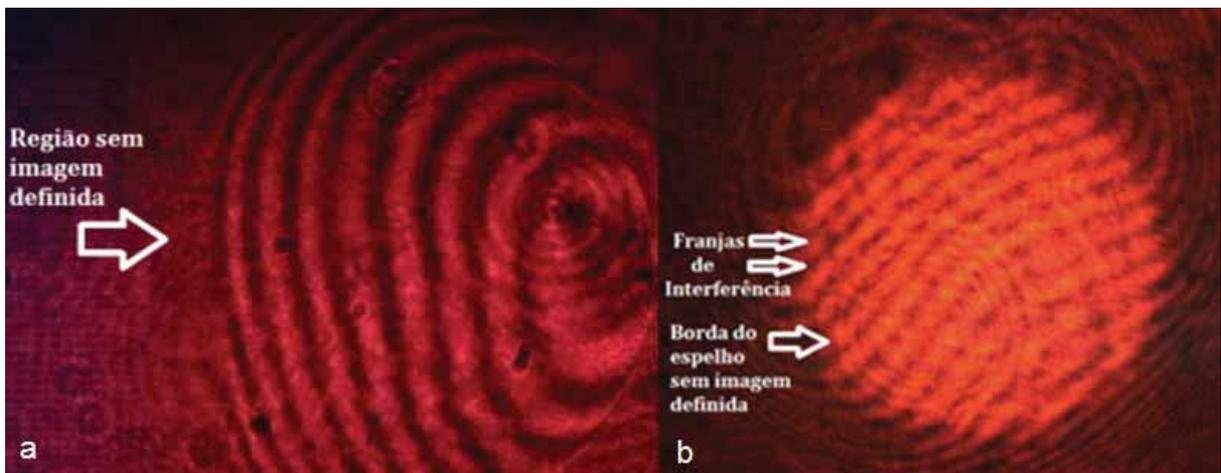


Figura 20 a – Imagem gerada por desalinhamento nas lentes da ocular. b - Franjas sem definição de imagem devido a grande distância entre as lentes oculares.

Outro problema que pode ser facilmente encontrado devido a utilização da madeira é a falta de alinhamento do conjunto óptico, se os componentes não estiverem alinhados, os feixes não permanecerão paralelos, sendo afastados um do outro, quando isso ocorre é captada apenas a imagem de um feixe. A figura 21 captada pelo interferômetro montado e utilizado no trabalho exemplifica a captação de apenas um feixe pela *webcam*. Para que esse problema não afete as medidas do trabalho, o interferômetro deve ser alinhado e seu alinhamento verificado duas vezes, com intervalos de dez minutos entre as verificações antes do início das medidas.

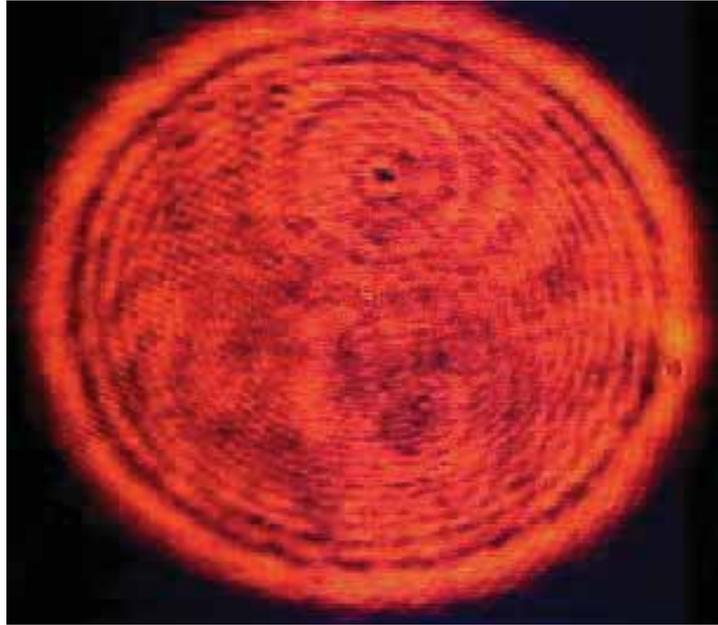


Figura 21 – Apenas o feixe de teste captado na *webcam* devido ao desalinhamento no conjunto óptico.

Para realizar o alinhamento do interferômetro, é necessário seguir alguns passos que serão exemplificados através de fotos obtidas durante o alinhamento do interferômetro:

- 1) Alinhar os dois feixes que saem de C. Para realizar esse alinhamento existem três componentes que podem se mover: o laser, C ou EP; os dois feixes devem sair paralelos e com uma distância entre eles menor que 8 mm (distâncias maiores inserem grandes quantidades de astigmatismo nas medidas), no interferômetro construído a distância entre os feixes é de 6mm como pode ser visto na figura 22. Essa inclusão de erro na medida será discutida posteriormente. Para verificar o alinhamento é necessário medir a distância entre os feixes a diversas distâncias do interferômetro, de preferência na saída do interferômetro e posteriormente a cada metro. Essa separação entre os feixes devem ter a mesma distância em todas as medidas. Realizado esse passo, L é colocado na frente do feixe de teste.



Figura 22 – Alinhamento dos dois feixes gerados no cubo divisor de feixe, distância entre eles não deve ser maior que 6 mm.

2) Para realizar o alinhamento de L, o feixe de referência (ponto brilhante a esquerda) deve sempre permanecer na mesma distância do centro do feixe de teste (ponto vermelho no centro da imagem), agora como uma frente de onda esférica (representada pelo círculo), como mostra a figura 23. Como feito anteriormente, é preciso verificar essa distância do feixe de referência ao centro do feixe de teste em diversas posições. Entretanto, como a frente de onda é pouco visível a longas distâncias não é possível verificar o alinhamento dos feixes a distâncias superiores a 1 metro do interferômetro.



Figura 23 – Alinhamento da frente de onda esférica criada por L e o feixe de referência.

Nessa etapa deve-se mirar o feixe de referência, para o centro do espelho, que irá refletir os feixes. Se colocarmos um anteparo no centro de curvatura do espelho será visto dois pontos brilhantes que são os dois feixes refletidos pelo espelho. Ao movimentarmos o anteparo para frente ou para trás veremos um desses pontos se expandindo e contraindo, esse feixe é o de teste. É preciso posicioná-lo próximo ao EP, e fazer com que o feixe de referência passe por L. Ao retornarem a C os feixes serão agora duas frentes de onda esférica, representados pelos dois círculos, sendo o maior o feixe de referência e o menor o feixe de teste. Como apenas parte do feixe de teste foi refletido pelo espelho, o formato circular do feixe de teste na verdade é o formato do espelho que está sendo testado. Portanto, a imagem captada do feixe de referência já é a imagem da superfície do espelho que será analisada, como mostra a figura 24.

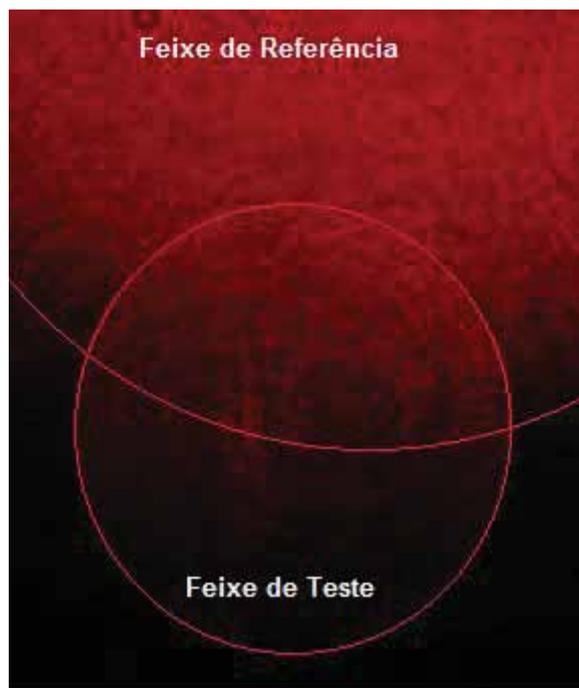


Figura 24 – Feixes de teste e referência ao retornar a C.

3) O último passo é alinhar os dois círculos e procurar pelas franjas de interferência, como mostra a figura 25. A medida que o círculo menor (representado pelo círculo vermelho na imagem) se movimenta dentro do maior, as franjas vão alterando o seu formato. Se as franjas não forem detectadas deve se movimentar a bancada nos eixos XYZ até que isso ocorra.



Figura 25 – Somatória dos feixes gerando as franjas de interferometria.

Para um bom controle do interferômetro, deve-se encontrar o centro de interferometria, obtido quando o disco central está na sua máxima expansão. O número de franjas em volta do disco central varia dependendo da curvatura do espelho. Na figura 26, é possível ver apenas uma franja em torno do disco bem próxima a borda com disco central cobrindo grande parte do espelho.



Figura 26 – Disco central de interferometria em sua máxima expansão entre o foco marginal e paraxial.

Todas as franjas de interferometria são concêntricas, para achar o centro da interferometria é necessário fazer com que o sistema óptico do interferômetro caminhe

para o centro das franjas, a figura 27 demonstra algumas posições das franjas de interferometria dependendo da posição do interferômetro.

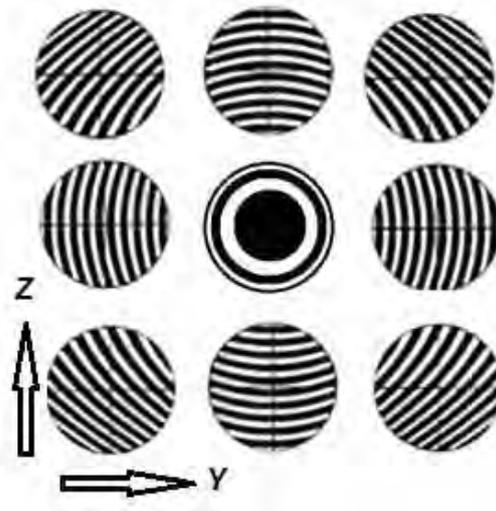


Figura 27 – Posição das franjas de interferometria devido ao deslocamento do interferômetro nos eixos YZ. Figura adaptada [22].

À medida que o interferômetro desloca para fora do centro de interferometria, o número de franjas aumenta, e quanto mais afastados do centro de interferometria mais finas são as franjas. É possível ver esse movimento das franjas através da figura 28, com o interferômetro sendo deslocado do centro de curvatura do espelho testado no eixo Y.

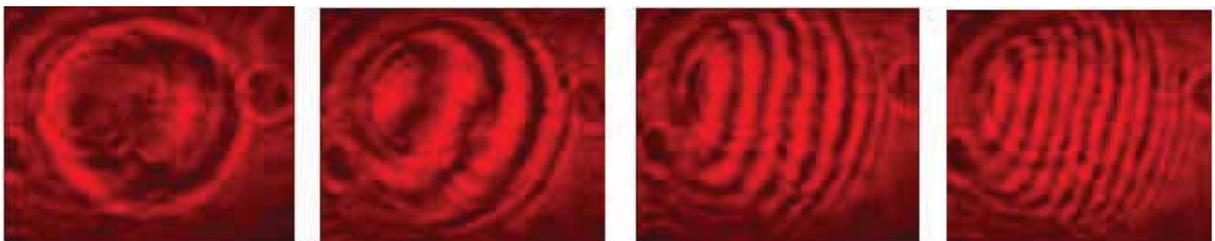


Figura 28 – Deslocamento no eixo Y do interferômetro e comportamento das franjas de interferometria do espelho testado.

Entretanto quando é encontrado o disco com as franjas circulares em torno, não necessariamente foi encontrado o centro de interferometria. Para posicionar o interferômetro no centro de interferometria, em torno do disco deve possuir o menor número de franja possível, para que isso aconteça o conjunto óptico deve avançar ou recuar

no eixo X (aproximando ou afastando do espelho). Quando o interferômetro estiver posicionado no centro de interferometria e avançamos o conjunto óptico em direção ao espelho, as franjas começam a diminuir sua espessura e aumentar o seu número. O mesmo acontece quando a bancada é recuada do centro de interferometria. A figura 29 mostra como as franjas ficam quando o interferômetro é posicionado antes do centro de interferometria, no centro e depois do centro de interferometria.



Figura 29 – Centro de interferometria de um espelho quase esférico antes do ponto focal, no ponto focal e após o ponto focal.

Esse procedimento é recomendado para verificar possíveis erros na montagem do interferômetro, como desalinhamento dos componentes ópticos e calibração do equipamento; verificar estabilidade e rigidez da plataforma em que os componentes foram montados; ou até mesmo verificar problemas no ambiente de trabalho, como instabilidade do laboratório devido a vibrações ou correntes de ar, entre outros. Quando os componentes ópticos estiverem desalinhados não será possível verificar as franjas de interferometria e o disco central de interferência. Se a plataforma em que o interferômetro foi montado não possui rigidez e estabilidade as franjas se deslocarão sem o equipamento ter sido movimentado. Quando o ambiente possui vibrações haverá um alto nível de vibração nas franjas e correntes de ar são detectadas através da distorção e movimentação das franjas.

Com o interferômetro devidamente posicionado e alinhado, é possível a partir das franjas realizar uma análise dos defeitos. Quando o espelho possui uma boa qualidade óptica, as franjas de interferometria seguem uma regularidade, como mostra a figura 30.

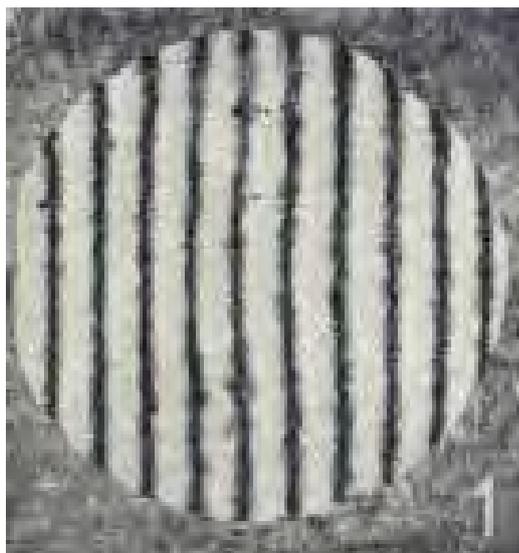


Figura 30 – Franjas retas de um espelho esférico [16].

A figura 28 pode ser associada à primeira imagem da figura 12 dos polinômios de Zernike, demonstrando que o sistema está levemente inclinado e fora do centro de interferometria. O espelho da figura 30 possui qualidade óptica devido a sua regularidade nas franjas, portanto, não é possível ver grandes deformações nas franjas de interferometria, entretanto, outros erros podem ser associados a figura 12 e são fáceis de serem identificados. Se o espelho tiver grandes defeitos suas franjas possuirão grandes deformações como mostra as figuras 31 e 32.

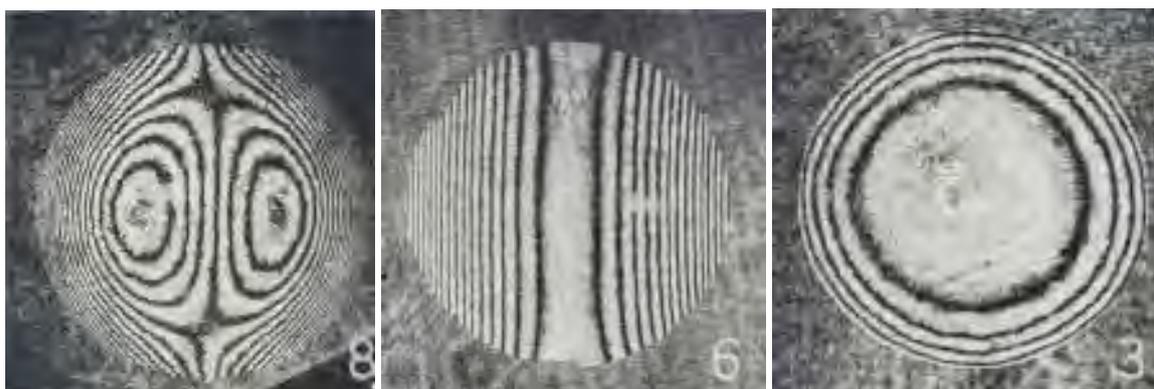


Figura 31 a) Coma

b) Astigmatismo

c) Aberração esférica [16].

A maior dificuldade encontrada na análise é quando ocorre a somatória de defeitos, como mostram as figuras 32 a, b, c e d.

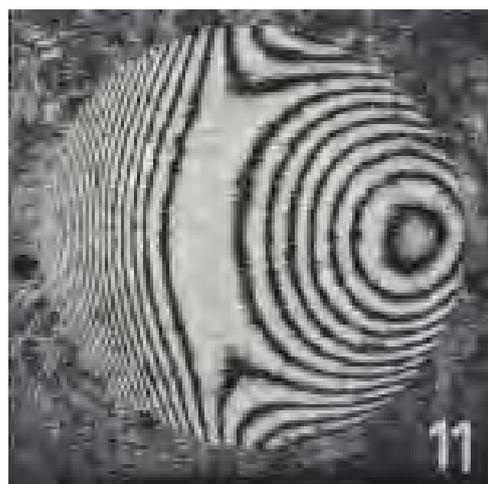
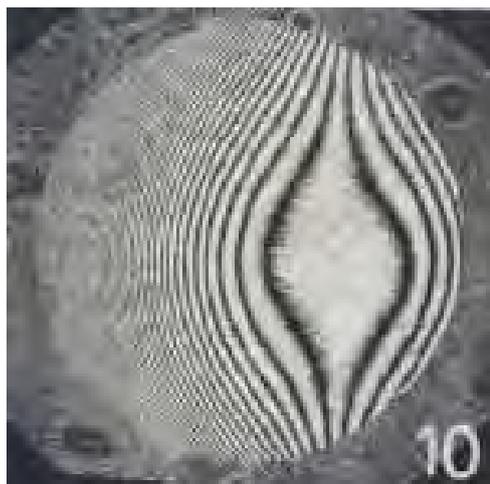
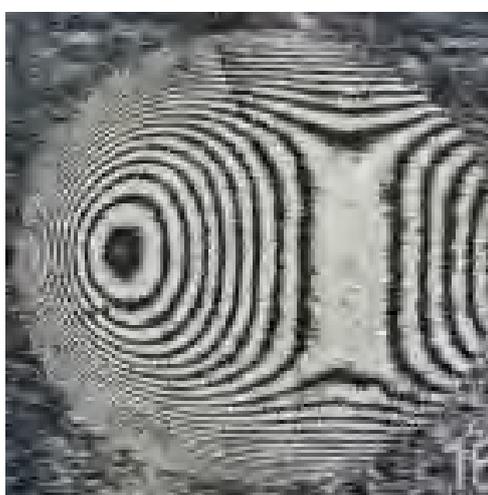


Figura 32 a) Coma e Aberração esférica

b) Astigmatismo e Coma



c) Astigmatismo e coma



d) Aberração esférica, coma e astigmatismo [16].

Apesar de ser possível ver deformações nas franjas de interferometria, nem todas franjas distorcidas, como visto anteriormente, indicam defeitos nos espelho. Na verdade, o espelho de telescópio, para possuir uma boa qualidade óptica deve possuir a curvatura parabólica, entretanto, quando um espelho parabólico reflete uma frente de onda esférica vinda do seu centro de curvatura, acaba criando aberração esférica na medida. Essa aberração é dada devido as diferentes distâncias percorridas pela frente de onda. Devido a isso nem toda franja de interferometria com curva acentuada indica um espelho ruim, a figura 33 possui exemplos de espelhos, sendo o primeiro esférico, o segundo com uma curvatura intermediária entre a esfera e parábola e o terceiro um espelho parabólico.

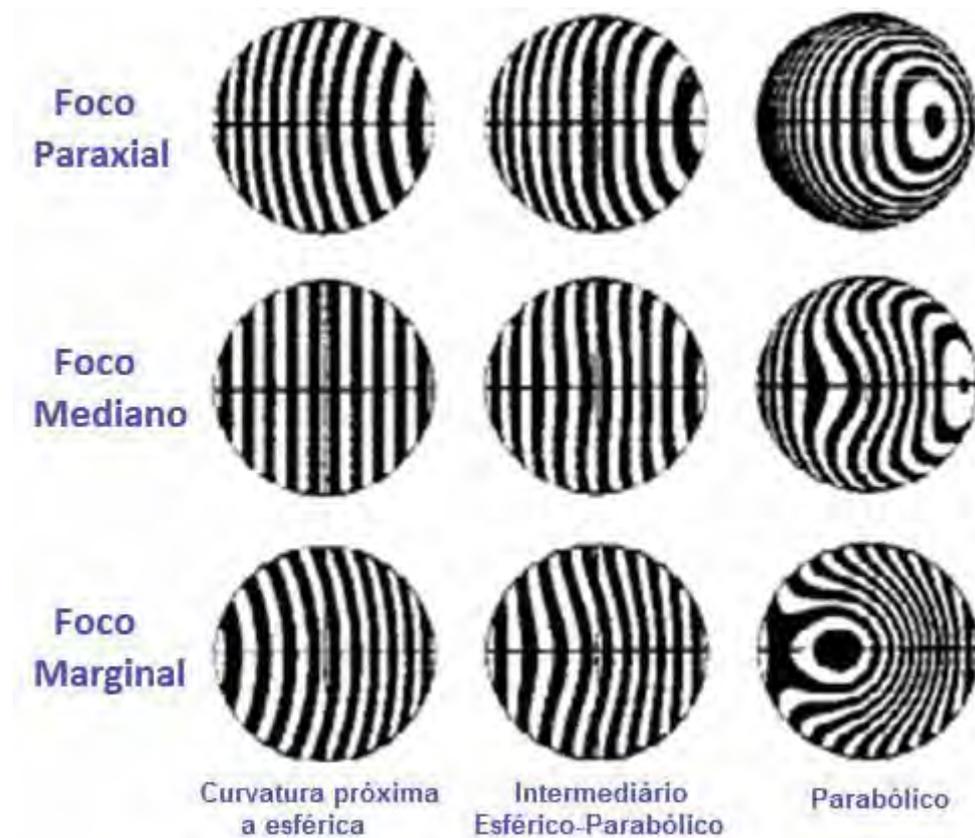


Figura 33 – Padrão das franjas de interferometria entre espelhos esféricos e parabólicos [22].

As diferentes franjas de interferometria são devido as diferentes posições em que o interferômetro se encontra na zona focal Δp do espelho, visto anteriormente.

Além do erro de esfericidade, o interferômetro de Bath insere erro de astigmatismo na medida, como o feixe de teste possui dois focos F1 e F2 como mostrado na figura 19. A distância entre esses dois pontos focais gera um erro de astigmatismo e para calcular a influência desse erro nas medidas deve-se considerar o centro de curvatura do espelho como sendo a origem do sistema de coordenadas. Com isso a distância lateral de cada foco à origem é b , e a distância longitudinal a partir da origem é f [23], como representado na figura 34.

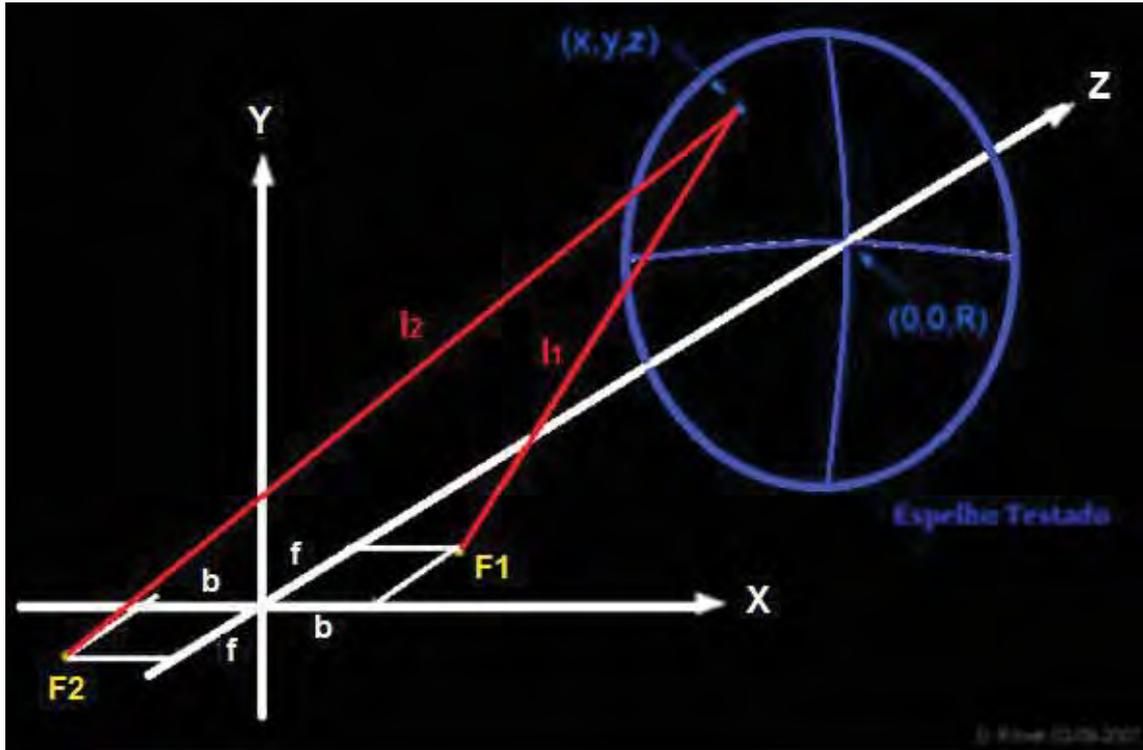


Figura 34 – Coordenadas tridimensionais do interferômetro de Bath [23].

Considerando um ponto qualquer (x,y,z) na superfície do espelho, a distância de F_1 até o ponto (x,y,z) é l_1 , e a distância de F_2 ao ponto é l_2 . O caminho percorrido pela luz nesse sistema será l_1+l_2 . Considerando R o raio de curvatura do espelho, a coordenada z da superfície do espelho [23] é dada por:

$$z^2 = R^2 - (x^2 + y^2) \quad (20)$$

A distância dos dois focos ao espelho é dada por:

$$l_1^2 = (x - b)^2 + y^2 + (z - f)^2 \quad (21)$$

$$l_2^2 = (x + b)^2 + y^2 + (z + f)^2 \quad (22)$$

Essa equação pode ser escrita como:

$$l_1^2 = l_0^2 - q \quad (23)$$

$$l_2^2 = l_0^2 + q \quad (24)$$

Onde:

$$l_0^2 = R^2 + b^2 + f^2 \quad (25)$$

$$q = 2(xb + zf) \quad (26)$$

Usando a expansão em série de Taylor da raiz quadrada de quarta ordem temos:

$$\sqrt{l_0^2 + q} \cong l_0 + \frac{q}{2l_0} - \frac{q^2}{8l_0^3} + \frac{q^3}{16l_0^5} - \frac{5q^4}{128l_0^7} \quad (27)$$

A diferença de caminho é dada por:

$$\Delta l = l_1 + l_2 - 2l_0 \cong -\left(\frac{q^2}{4l_0^3} + \frac{5q^4}{64l_0^7}\right) \cong -\left(\frac{q^2}{4R^3} + \frac{5q^4}{64R^7}\right) \quad (28)$$

Expandindo os termos da equação 28:

$$\Delta l = -\left(\frac{b^2x^2}{R^3} + \frac{f^2z^2}{R^3} + \frac{2bfxz}{R^3} + \frac{5b^4x^4}{4R^7} + \frac{5f^4z^4}{4R^7} + \frac{5bf^3xz^3}{R^7} + \frac{5b^3fx^3z}{R^7} + \frac{15b^2f^2x^2z^2}{2R^7}\right) \quad (29)$$

Entretanto, apenas o primeiro termo é significativo para calcular o astigmatismo induzido pela geometria do interferômetro de Bath. A diferença de caminho (*optical path length difference* = OPD) [23] dada pelo centro do espelho ($x=0$) e pela borda ($x=D'/2$) é:

$$OPD = \frac{d^2 D'^2}{4R^3} \quad (30)$$

Onde D' é o diâmetro do espelho, d a separação entre os feixes e R o raio do centro de curvatura do espelho.

Para interpretar as franjas com mais precisão é necessária a utilização de *softwares* computacionais, que auxiliam a interpretação dos polinômios de Zernike para gerar superfícies em 3D.

3.2 Análise computacional

Para análise computacional foi utilizado o programa *OpenFringe*, inserindo dados dos espelhos como diâmetro (D'), raio de curvatura (R) e obstrução causada pelo espelho secundário (*Obstruction*). Com esses dados o programa gera uma superfície ideal e uma frente de onda perfeita dessa superfície que são utilizadas como padrões. Ao analisarmos a frente de onda gerada pelo espelho testado, através das franjas de interferometria, o programa compara as diferenças entre a frente de onda gerada pelo espelho e a gerada pelo programa e através dos polinômios de Zernike, determina os defeitos na superfície do espelho e seus respectivos tamanhos.

O programa também retira algumas aberrações causadas pelas medidas, como a aberração esférica, gerada pela medida no centro de curvatura, denominada como anulamento artificial da esfericidade. Na análise computacional é definido como *Artificial Null*, e determinada através do oitavo polinômio de Zernike dado pela relação.

$$Z_8 = \frac{D'^4}{384 \lambda R^3} \quad (31)$$

Onde D' é o diâmetro do espelho, λ o comprimento de onda utilizado e R o raio do centro de curvatura. Como o espelho parabólico possui vários raios de curvatura, quando a frente de onda esférica for refletida por ele, ocorrerá uma defasagem na mesma, devido as diferentes caminhos ópticos percorridos por ela. Essa defasagem na frente de onda é conhecida como aberração esférica.

O programa também calcula e retira o erro de astigmatismo gerado pelo interferômetro, apenas informado o Raio do centro de curvatura do espelho, o diâmetro do espelho e a separação entre os feixes de referência e de teste através da relação 30.

Através das características do espelho e das franjas de interferometria o programa gera a superfície do espelho em 3D com seus respectivos *Fator Strehl*, σ (*wavefront* que será analisado nas tabelas posteriores como frente de onda) e *Best Conic* (sendo a curvatura dos

espelhos e apresentada nas tabelas posteriores como **b**, conforme definido na seção 2.8). A imagem da superfície gerada em 3D é mostrada na figura 35.

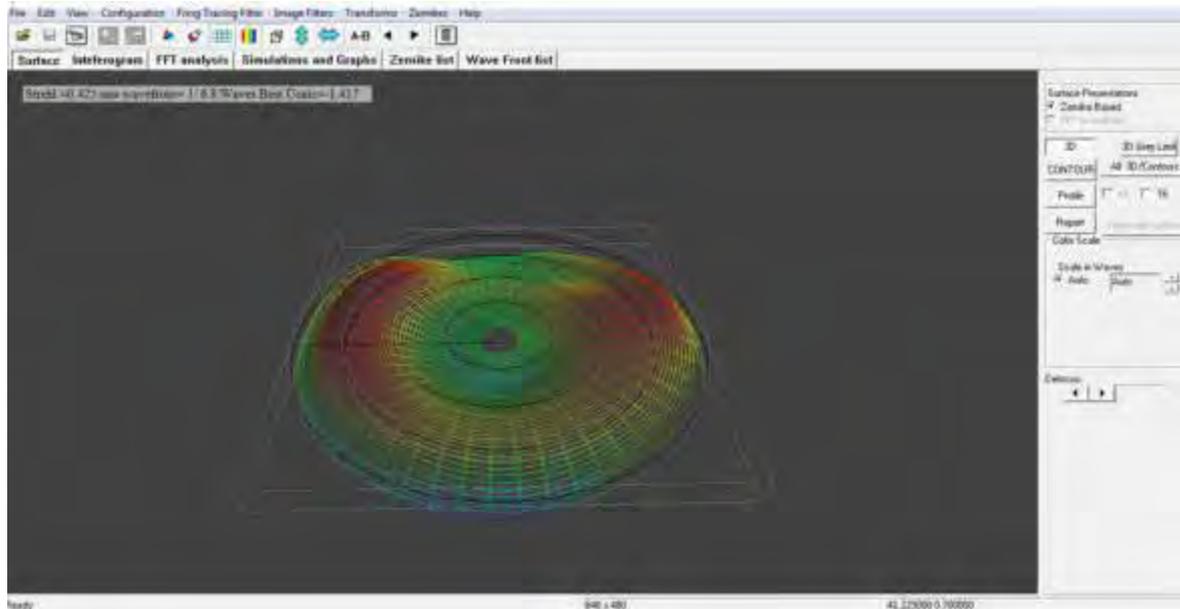


Figura 35 – Imagem computacional em 3D da superfície do espelho testado, gerada pelo programa.

Através das imagens geradas conseguimos identificar defeitos na superfície do espelho, para corrigir esses defeitos captados é realizada uma nova sessão de polimento localizado. Na figura 35 é possível verificar que a região vermelha entre o centro e a borda do espelho está elevada em relação a curvatura ideal, ela possui um pico. Através de uma nova sessão de polimento localizada nessa região conseguimos abaixar seu nível e deixá-lo mais próximo da curvatura ideal. Entretanto, numa região com o nível abaixo da curvatura ideal, com um vale, não é possível adicionar material para que essa região se aproxime da curvatura, é então necessário rebaixar toda a superfície do espelho.

3.3 Metodologia para análise da superfície

Os materiais analisados fazem parte dos componentes ópticos de telescópios do tipo newtoniano [24] em uso no Observatório Didático de Astronomia “Lionel José Andriatto” da UNESP Campus de Bauru, sendo que um deles foi gentilmente cedido pelo Centro de Estudos do Universo (Fundação CEU), localizado na cidade de Brotas-SP, cuja principal proposta é atuar como um centro de divulgação e ensino de ciências astronômicas, assim como o Observatório da UNESP, em Bauru. Os três espelhos analisados, dos telescópios do Observatório da UNESP, foram obtidos de maneira totalmente artesanal, através do esmerilhamento e polimento de blocos de vidro Soda-Cálcicos, com 19 mm de espessura [25, 26]. O quarto espelho analisado, com 35 mm de espessura, é composto por vidro Boro-Silicato e foi obtido comercialmente pela Fundação CEU através de importação dos Estados Unidos, do fabricante especializado Meade [27].

Os telescópios Newtonianos são constituídos por dois espelhos: um chamado de espelho primário, cuja superfície é côncava, e que será analisado nesse trabalho; e um espelho plano denominado secundário que, por estar localizado na frente do espelho primário causa uma pequena obstrução da luz, formando uma sombra circular no centro do espelho primário [20]. As denominações para cada espelho e suas principais características como diâmetro (diâmetro de abertura do equipamento), raio do centro de curvatura (R), obstrução causada pelo espelho secundário e matéria prima utilizada estão listados na tabela 5.

Tabela 5 – Características gerais dos espelhos analisados.

Espelho	Diâmetro (mm)	R (mm)	Obstrução (mm)	Matéria Prima
M1	190	3860	40	Soda-Cálcico
T1	190	2820	40	Soda-Cálcico
P1	230	2340	60	Soda-Cálcico
Comercial	200	2470	45	Boro-Silicato

A superfície refletora do espelho é obtida através do processo de aluminização da superfície curva, por vaporização de alumínio a vácuo. Nesse processo, o alumínio é fixado a um filamento que o aquece com um fluxo de corrente de alta voltagem, fazendo com que o alumínio se vaporize e fixe sobre a superfície do vidro formando uma fina camada de alumínio [6].

3.4 Medidas de Interferometria

As medidas foram realizadas em diferentes temperaturas, com o intuito de verificar se a variação de temperatura causa alguma deformação mensurável no interferômetro. Essa é uma análise importante para avaliar a superfície dos espelhos, uma vez que deformações na superfície podem causar aberrações que comprometem a qualidade óptica dos espelhos e, conseqüentemente, sua utilização nos telescópios. Para realizar essas medidas os espelhos foram apoiados em seus próprios suportes e mantidos na horizontal como mostra a figura 36, as presilhas de fixação dos suportes foram soltas para não influenciar na dilatação dos espelhos. As temperaturas de medidas foram 12°C, 15°C, 20°C e 25°C.



Figura 36 – Espelhos T1, M1 e P1 nos seus suportes planos na horizontal.

Os gráficos apresentados nas figuras 37, 38 e 39 demonstram a variação da temperatura durante o dia, obtida através dos dados captados pela estação meteorológica do Instituto de Pesquisas Meteorológicas da UNESP (IPMet), Campus de Bauru. A estação encontra-se situada a aproximadamente 80 metros do laboratório onde se encontra instalado o interferômetro, sendo que a diferença máxima verificada entre a temperatura externa (na estação) e a interna (no laboratório) foi de 3°C. As setas indicam a hora em que as medidas de interferometria foram realizadas e a temperatura interna do laboratório enquanto a linha indica a variação de temperatura externa ao laboratório durante o dia.

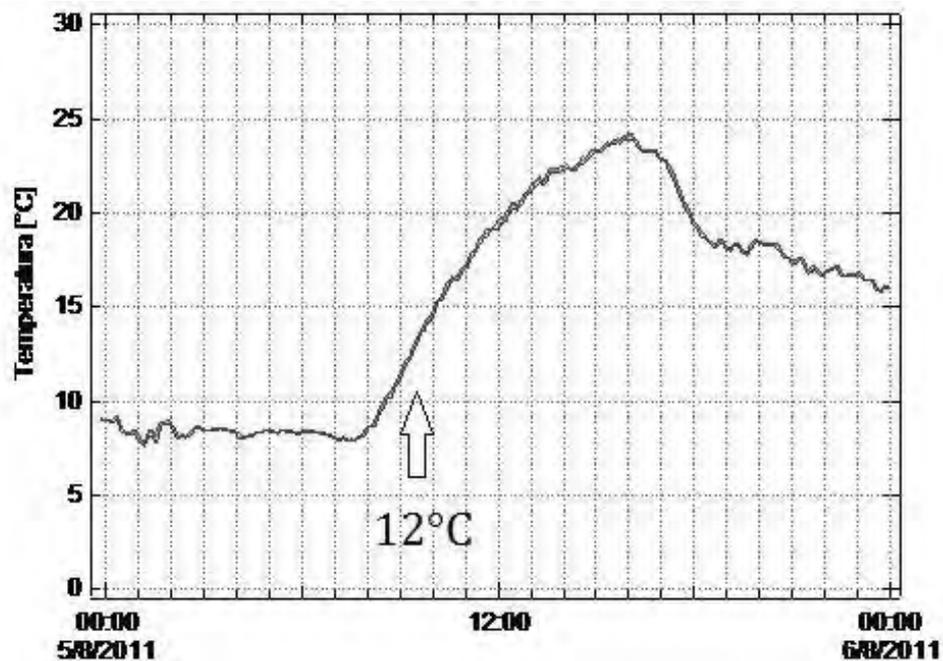


Figura 37 – Variação de temperatura durante o dia 05/08/2011.

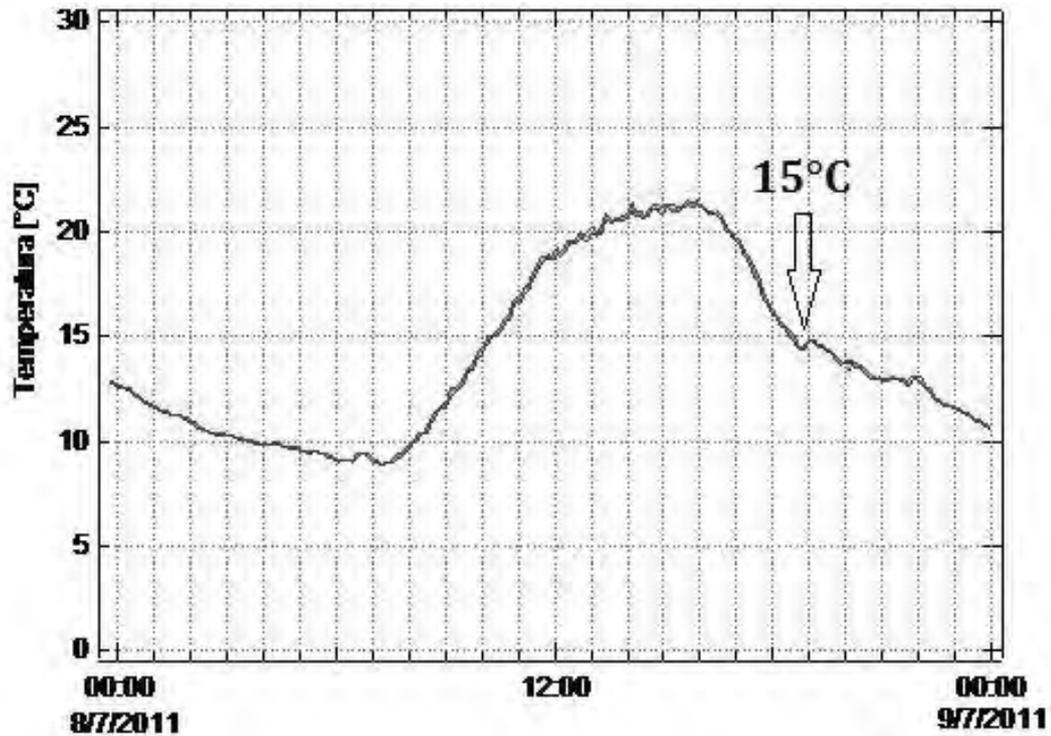


Figura 38 - Variação de temperatura durante o dia 08/07/2011.

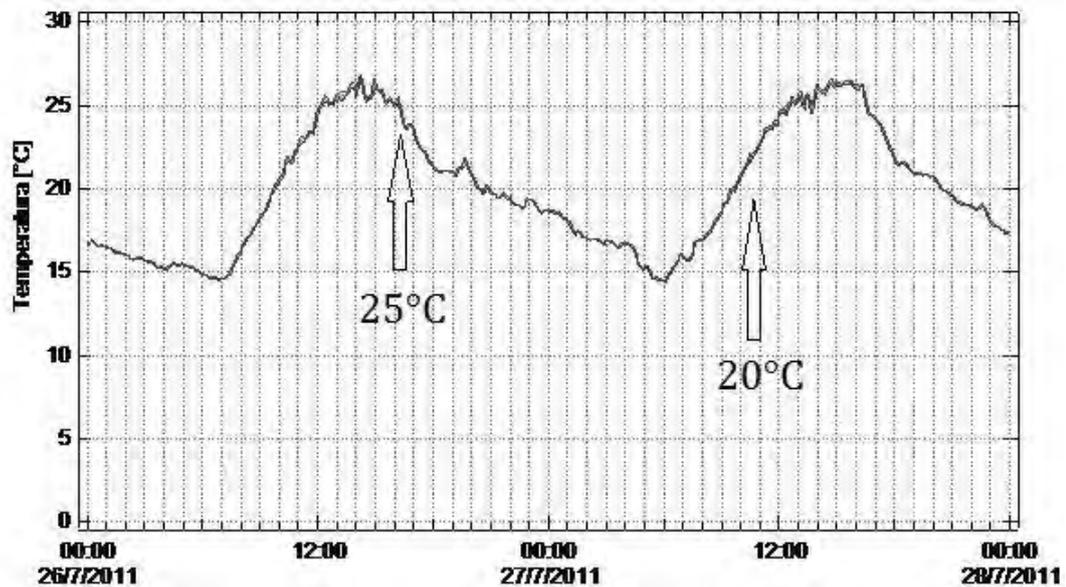


Figura 39 – Variação de temperatura durante os dias 26 e 27/07/2011.

Com o término das medidas com a variação de temperatura, com o laboratório a temperatura de 20°C, o mesmo foi fechado e o sistema de refrigeração foi ligado, a temperatura do laboratório foi estabilizada em 16°C. Após 20 horas com o ambiente fechado a 16°C foram realizadas as primeiras medidas de interferometria com temperatura estável

do laboratório, após 28 horas de ambiente fechado, foram realizadas novas medidas. Para realização dessas medidas o aparelho condicionador de ar foi desligado e aguardou-se três minutos para que as correntes de ar criadas no laboratório fossem estabilizadas, antes da captação das imagens de interferometria. Esse processo foi mantido em todas as medidas a 16 °C, devido ao condicionador de ar criar correntes de ar dentro da sala e a mínima movimentação de ar, ser observada no interferômetro através da movimentação e deformação nas franjas de interferometria, atrapalhando a captação e análise das imagens no interferômetro. Esse fenômeno de movimentação de ar no laboratório foi detectado na análise do espelho M1, nas medidas a temperatura variável de 12, 15 e 20°C, e na temperatura estável do laboratório em 16°C após 28 horas com o ambiente fechado.

Outro efeito de interesse investigado é o da gravidade sobre os próprios espelhos. Para isso, com a temperatura do laboratório estabilizada em 16°C, os espelhos foram colocados na vertical como mostra a figura 40.



Figura 40 – Espelhos P1 e T1 com seus suportes na vertical.

Os espelhos foram mantidos nessa posição durante 24 e 48 horas respectivamente, sendo apoiados apenas pelos ganchos dos suportes, como visto na figura 40. A investigação do efeito da gravidade na formação de possíveis defeitos na superfície dos espelhos leva em conta a lei de A. Couder [4, 10], que diz que quando o espelho não possui a espessura

mínima fornecida pela relação abaixo, o mesmo terá sua superfície deformada e, consequentemente a frente de onda.

$$\frac{h^4}{e'^2} \leq 1000 \quad (32)$$

onde h é o raio de abertura do espelho e e' a espessura, sendo a relação dada em centímetros, a relação de cada espelho pode ser observada na tabela 6.

Tabela 6 – Relação entre o raio de abertura e espessura dos espelhos

Espelho	Relação de A. Couder
M1	2256
T1	2256
P1	4845
Comercial	816

O espelho comercial é o único a respeitar a relação de A. Couder, com a relação entre o raio de abertura do espelho e sua espessura abaixo de 1000.

Outro método empregado para avaliar os espelhos, foi retirá-los de seus suportes e apoiá-los apenas pela borda, distanciados com os apoios a 180°, como mostra a figura 41. Esse procedimento foi realizado para dois espelhos e teve como objetivo verificar a deformação elástica sofrida na superfície do mesmo, sobre o efeito do seu próprio peso, investigando a deformação causada em sua curvatura como consequência disso.



Figura 41 – Espelhos apoiados apenas por dois pontos em sua borda, para determinar as deformações causadas pelo seu próprio peso.

Os espelhos permaneceram suspensos durante 24 horas, posteriormente foram girados em 90° nos seus apoios e permaneceram por mais 24 horas, ao realizar esse giro nos apoios os espelhos foram apoiados por suas bordas que apresentavam o erro local de borda caída.

A cada teste em que os espelhos foram submetidos, foram retiradas aproximadamente 60 fotos de cada espelho, sendo retiradas ao todo aproximadamente 5.000 fotos em todo o trabalho, sendo de calibração do interferômetro e análise dos espelhos. Para obtenção dos resultados apresentados no capítulo 4, foram realizadas análises de três fotos de cada espelho no teste, sendo escolhidas de maneira aleatória, e através dessas fotos feito uma média dos resultados obtidos.

3.5 Análise Química

A composição química do vidro utilizado para obter o espelho T1 foi determinada através da técnica de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X, realizada pela equipe do Centro Técnico de Elaboração de Vidro (CETEV), na fábrica de vidros Saint Gobain, localizada na cidade de São Paulo.

Quando os átomos de uma amostra são atingidos por Raios X, eles ejetam elétrons das camadas mais próximas ao núcleo, essa vacância criada é preenchida por elétrons das camadas mais externas [28] como mostra a figura 42.

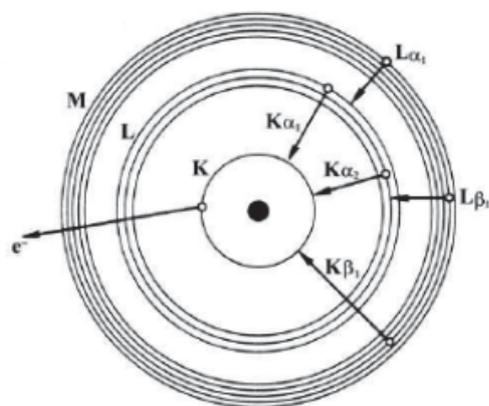


Figura 42 – Excitação do nível eletrônico interno e possibilidades de preenchimento da vacância [28].

Esse processo faz com que ocorra a emissão de Raios X característicos dos elementos presentes no material. A energia liberada nessas emissões corresponde a diferença entre os níveis que ocorrem as transições [28].

Cada átomo possui um espectro de Raios X característico onde é possível identificar a composição química da amostra. Entretanto, para ocorrer esse processo é necessário que os Raios-X sejam operados em condições que supere a energia crítica de excitação do nível K dos elementos a serem identificados; se essa energia não superar a energia de excitação do nível K, ocorrerá difração dos Raios X [28].

3.6 Análise Estrutural

Para realizar as medidas de difração de Raios X, foi utilizado um difratômetro da marca Rigaku modelo D/MAX-2100PC, com radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,5405\text{\AA}$) e filtro de Ni para eliminação da radiação $\text{K}\beta$, com fenda de abertura com 10 mm, corrente de 20mA e potencial de 40kV, com varredura do detector feita de 5 a 90° em noventa minutos [29].

Os Raios X são radiações eletromagnéticas de alta energia e pequenos comprimentos de onda [30]. Quando esse feixe incide em um material sólido uma parte dessa radiação é

difratada, quando esse obstáculo possuir uma regularidade entre suas distâncias atômicas interplanares. As ondas difratadas pelos diferentes planos passam a percorrer diferentes distâncias e quando essa diferença de percurso corresponde a um número inteiro de comprimento de onda cria uma interferência construtiva. Essa interferometria causada pela difração pode ser vista em diferentes ângulos e é determinado pela lei de Bragg [25] dada pela relação:

$$n\lambda = 2 d_{hkl} \text{sen}\theta \quad (33)$$

Onde n é o número de comprimentos de onda, λ o comprimento de onda dos Raios X, θ o ângulo em que ocorre a difração e d_{hkl} é o espaçamento interplanar de cristais cúbicos [30] dado através da relação:

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (34)$$

onde a representa o parâmetro de rede cristalina, h , k e l sendo os índices de Miller utilizados para descrever os conjuntos dos planos cristalinos.

Nas medidas de Difração de Raios X utilizada a amostra é pulverizada e colocada no difratometro. Com as partículas de pó distribuídas de maneira aleatória, o difratometro determina os ângulos de difração no material de maneira experimental. Os ângulos onde os picos são gerados ocorrem onde a condição de difração de Bragg determina. Esses picos estão identificados de acordo com os planos que deram origem aos mesmos. A figura 43 mostra o espectro de difração de raios X da estrutura cristalina de Quartzo alfa.

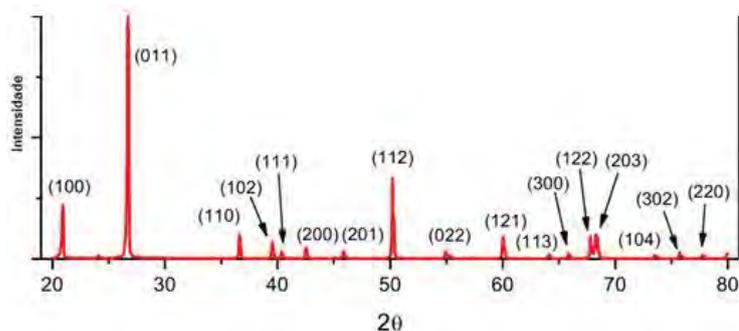


Figura 43 - Difratograma de uma amostra de Quartzo alfa [31].

A medida foi realizada para acompanhar as propriedades estruturais do material estudado, como sendo uma estrutura amorfa. Como a estrutura amorfa não possui distância regular entre seus planos, não ocorrem picos característicos na difração de Raios X como acontece no exemplo acima [32], o gráfico mostra apenas um largo pico como mostra a figura 44.

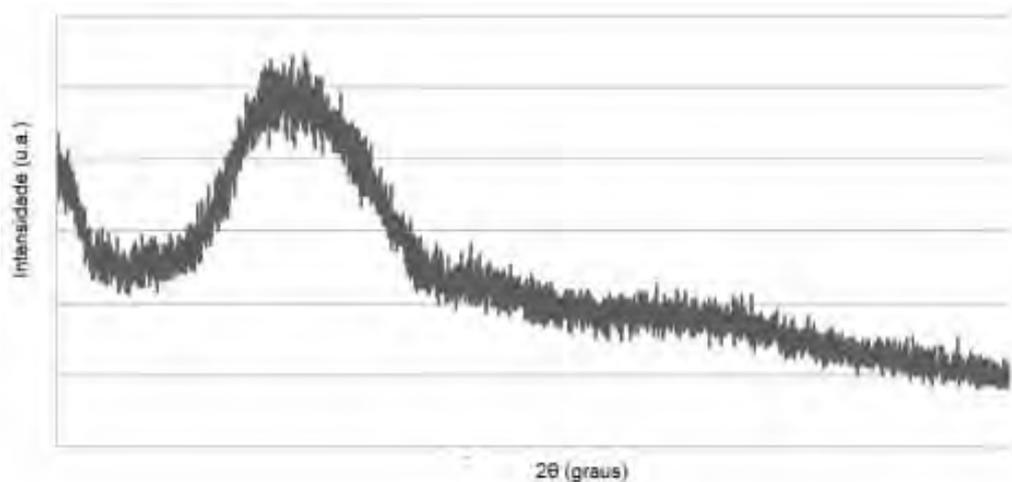


Figura 44 – Difração de Raios X de uma estrutura amorfa.

Através do formato bem característico da difração de Raios X de estruturas amorfas, não apresentando picos característicos como os das estruturas cristalinas, conseguimos verificar que material é amorfo [32].

4 Resultados e Discussões

Para os espelhos serem avaliados com boa qualidade óptica, devem possuir o fator Strehl próximo de 1, que indica um espelho sem defeitos na superfície, e sua frente de onda deve possuir a menor distorção possível. Essa distorção é dada em comprimento de onda sendo λ o comprimento de onda 550 nm. O espelho deve ainda possuir a curvatura ideal, podendo ser parabólico, hiperbólico, elíptico ou esférico como já mencionado. Nas tabelas

seguintes essa curvatura será denominada como **b**, enquanto que no programa *OpenFringe* essa variável é denominada como *Best Conic*. Uma superfície ideal e os valores considerados padrões ideais para cada espelho especificadamente são gerados pelo programa e são utilizados como parâmetros para comparação com os espelhos a serem analisados. Os parâmetros de referência são mostrados na tabela 7. Os padrões dos espelhos ideais não variam em diferentes temperaturas.

Tabela 7 – Parâmetros ideais de cada espelho gerado pelo programa *OpenFringe* a qualquer temperatura.

Espelho ideal	Fator Strehl	(λ)	b
Espelho T1	0.999	0.004	-0.965
Espelho P1	0.990	0.016	-0.965
Espelho M1	0.999	0.004	0
Espelho Comercial	0.998	0.008	-0.965

Sendo o fator Strehl o que define a qualidade óptica do espelho, temos 1 o espelho perfeito e 0 um espelho sem condições de uso. O valor de λ é dado pela somatória média de todos os erros de picos e vales (P-V) na frente de onda e **b** é o fator que define a curvatura do espelho, visto na tabela 8.

Tabela 8 – Curvatura do espelho relacionada ao Fator **b**.

Curvatura	b
Elipse	$0 < b < 1$
Circunferência	$b = 1$
Elipse	$-1 < b < 0$
Parábola	$b = -1$
Hipérbole	$b < -1$

Através das características de cada espelho visto anteriormente na tabela 5 o programa gera superfícies ideais e a frente de onda ideal de cada espelho. Realizando a medida no interferômetro da frente de onda de cada espelho analisado o programa faz a

comparação entre essas duas frentes de onda (ideal e gerada no interferômetro), calculando através dos polinômios de Zernike, os defeitos na superfície do espelho.

4.1. Medidas de Interferometria em função da variação da temperatura

A primeira medida foi realizada em função da temperatura do ambiente. Para analisar o comportamento dos espelhos, cada um deles tem seus resultados apresentados em uma tabela de variação de temperatura. A tabela 9 possui os resultados do espelho T1 em função da variação da temperatura do laboratório com seus respectivos desvios padrão, sendo dados pela raiz quadrada da soma dos quadrados dos desvios dividido pelo número de fotos analisadas.

Tabela 9 – Comportamento do espelho T1 com a variação de temperatura.

Temperatura	Fator Strehl	$\sigma(\lambda)$	b
12°C	0.229 ± 0.057	0.192 ± 0.011	-1.052 ± 0.044
15°C	0.683 ± 0.034	0.098 ± 0.016	-1.049 ± 0.033
20°C	0.343 ± 0.013	0.163 ± 0.032	-1.072 ± 0.062
25°C	0.698 ± 0.042	0.095 ± 0.027	-1.083 ± 0.064

A somatória da distorção causada pelos diferentes índices de dilatação entre o vidro e o alumínio, associado a maior condutividade térmica do alumínio, faz com que a superfície do espelhada se resfrie mais rápido que o centro do vidro, criando um gradiente de temperatura entre a superfície e o centro, deformando a superfície do espelho.

Em menores temperaturas apesar da curvatura ficar mais próxima da ideal ($b = -0,965$ na tabela 7), como vemos na temperatura de 12°C, em que $b = -1.052$, enquanto a

25°C $b = -1.083$, a qualidade óptica do espelho não melhorou. Na verdade ressaltou alguns de seus defeitos locais na superfície, como pode ser visto através do aumento da somatória dos erros da superfície dado por σ de 0.192λ . Esse efeito pode ser observado na figura 42. Essa queda na qualidade óptica pode ser notada também na tabela 9, com a mudança no fator Strehl em que a temperatura a 12°C esse fator diminui para 0.229, enquanto a 25°C estava em 0.698, e seu σ de 0.095λ .

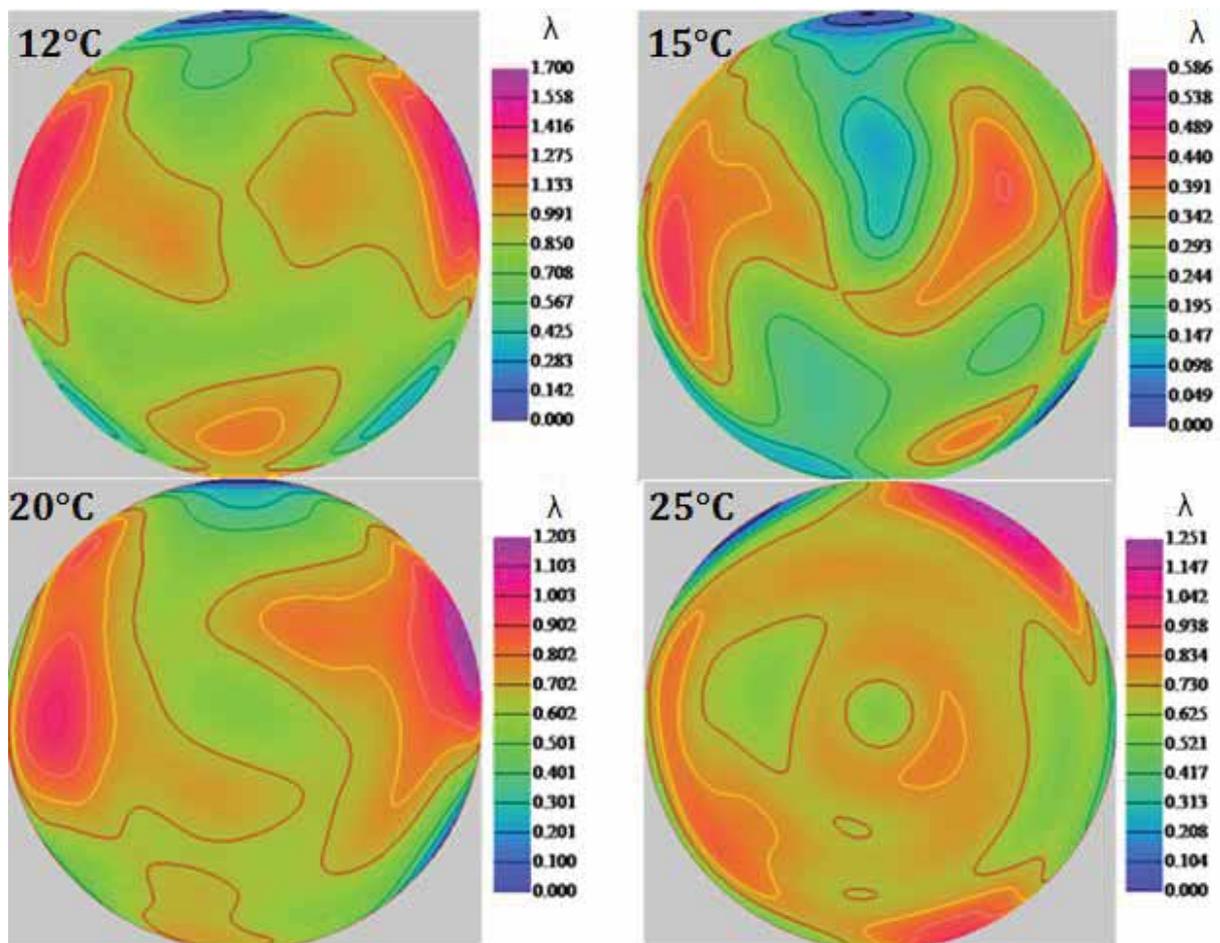


Figura 45 – Mapa de relevo do espelho T1 para medidas em função da temperatura.

Os defeitos locais são vistos na figura 45 através das diferentes cores, onde, as regiões em azul escuro são as regiões mais baixas (vales) do espelho e as roxas mais altas (picos). É possível verificar que a temperatura de 12°C, a diferença entre os picos e vales são maiores do que em outras temperaturas, sendo a diferença entre as regiões PV (Pico-Vale) de 1.7λ ($\lambda = 550 \text{ nm}$). Como o σ é calculado a partir de todos os defeitos da superfície, conseguimos verificar que seu valor fica acima das demais temperaturas sendo de 0.192λ .

Assim, como o fator Strehl é calculado através do σ , sua qualidade óptica pode ser considerada baixa.

A temperatura de 25°C, a superfície do espelho também possui grandes diferenças entre seus picos e vales, de 1.251 λ , fazendo com que a frente de onda tenha uma deformação de 2.502 λ . Entretanto, a somatória de todos os defeitos não é grande como pode ser analisado através do valor de σ de 0.095 λ . Isto ocorre devido a área ocupada pelos defeitos ser pequena, menor do que nas demais temperaturas. Como a frente de onda é pouco deformada, isso faz com que seu fator Strehl fique em 0.698.

A temperatura de 15°C, apesar dos defeitos ocuparem uma grande área da superfície como mostra a figura 45, a diferença entre seus picos e vales é a menor de todas as temperaturas, sendo de apenas 0.586 λ , fazendo com que a somatória de todos os seus erros fique em 0.098 λ . Consequentemente, seu fator Strehl tem um o valor de 0.683, como mostra a tabela 8.

Nessa temperatura, 15°C, a análise da superfície teve um comportamento diferente das demais temperaturas, como a medida a 15°C foi realizada em um dia que a temperatura estava diminuindo, diferente dos demais dias como visto nas figuras 37, 38 e 39, o espelho estava em contração térmica e esse processo de contração pode ser o responsável pela menor valor de $b = -1.049$, visto na tabela 9, a curvatura é mais próxima de uma curva parabólica do que à temperatura de 12°C. O responsável por esse comportamento pode ser a camada de alumínio, que deve possui uma condutividade térmica maior e resfria a superfície aluminizada mais rápido que o corpo do vidro, fazendo com que sua contração seja maior como foi observado.

Os valores do Fator Strehl e σ do espelho T1 tiveram uma grande variação entre as diversas temperaturas, esse comportamento pode ser gerado pelo apoio do espelho, que pode não possuir a superfície totalmente plana, como os apoios dos telescópios são feitos de madeira, e desde que esse telescópio foi confeccionado em 2006 não recebeu nenhuma manutenção preventiva, com o tempo o suporte pode ter empenado devido a humidade ou variação de temperatura, fazendo com que sua superfície tenha problemas de picos e vales e forcem o vidro, como o vidro possui um comportamento elástico, o apoio pode deformar o espelho. Como os espelhos não tinha uma posição definida para ser colocado no suporte,

cada hora uma região poderia ser pressionada pelo suporte, fazendo com que os erros na superfície do mesmo possam variar de medida para medida.

Para que o espelho fique fixo no suporte, são colocadas 3 presilhas que prendem os espelhos pro três regiões em sua bordas, as presilhas seguram a borda do espelho e podem forçar essas regiões do espelho para baixo, fazendo com que a borda do espelho nessa região seja rebaixada e apresente o defeito de vale, esse problema é possível ser visto através das regiões das bordas em azul na figura 45.

Outro problema que pode ter somado para a aparição das deformações na superfície do espelho, é o gradiente de composição no vidro, como o vidro é de baixa qualidade, em sua extensão pode haver diferentes composições, e como cada uma possui um diferente comportamento, com a variação da temperatura, pode ter ocorrido essas modificações não uniforme na superfície.

A tabela 10 apresenta os parâmetros obtidos através da variação de temperatura para o espelho P1.

Tabela 10 – Comportamento do espelho P1 com a variação de temperatura.

Temperatura	Fator Strehl	σ (λ)	b
12°C	0.698 ± 0.005	0.095 ± 0.002	-0.897 ± 0.011
15°C	0.514 ± 0.019	0.129 ± 0.015	-0.830 ± 0.026
20°C	0.593 ± 0.014	0.114 ± 0.018	-0.925 ± 0.044
25°C	0.468 ± 0.011	0.138 ± 0.021	-1.055 ± 0.068

O espelho P1 também segue a mesma tendência do espelho T1, de modificar a curvatura (vista na mudança do fator b , na tabela 10), à medida que a temperatura do ambiente de medida diminui, quando o fator b também diminui.

Analisando a tabela 10, conseguimos ver que com a diminuição da temperatura, o espelho se afasta da curvatura ideal, identificada pelo fator b . A 20°C o espelho se encontra muito próximo da curvatura ideal com $b = -0.925$ (Ideal = -0.965). Entretanto, não é a temperatura em que o espelho possui a melhor qualidade óptica, pois mesmo com $b = -0.897$ mais afastado da curvatura ideal, seu melhor desempenho foi visto na temperatura de 12 °C, onde seu fator Strehl é de 0.698, como pode ser visto na tabela 9. Na figura 46 é

possível verificar as modificações que ocorreram na superfície do espelho em função da temperatura.

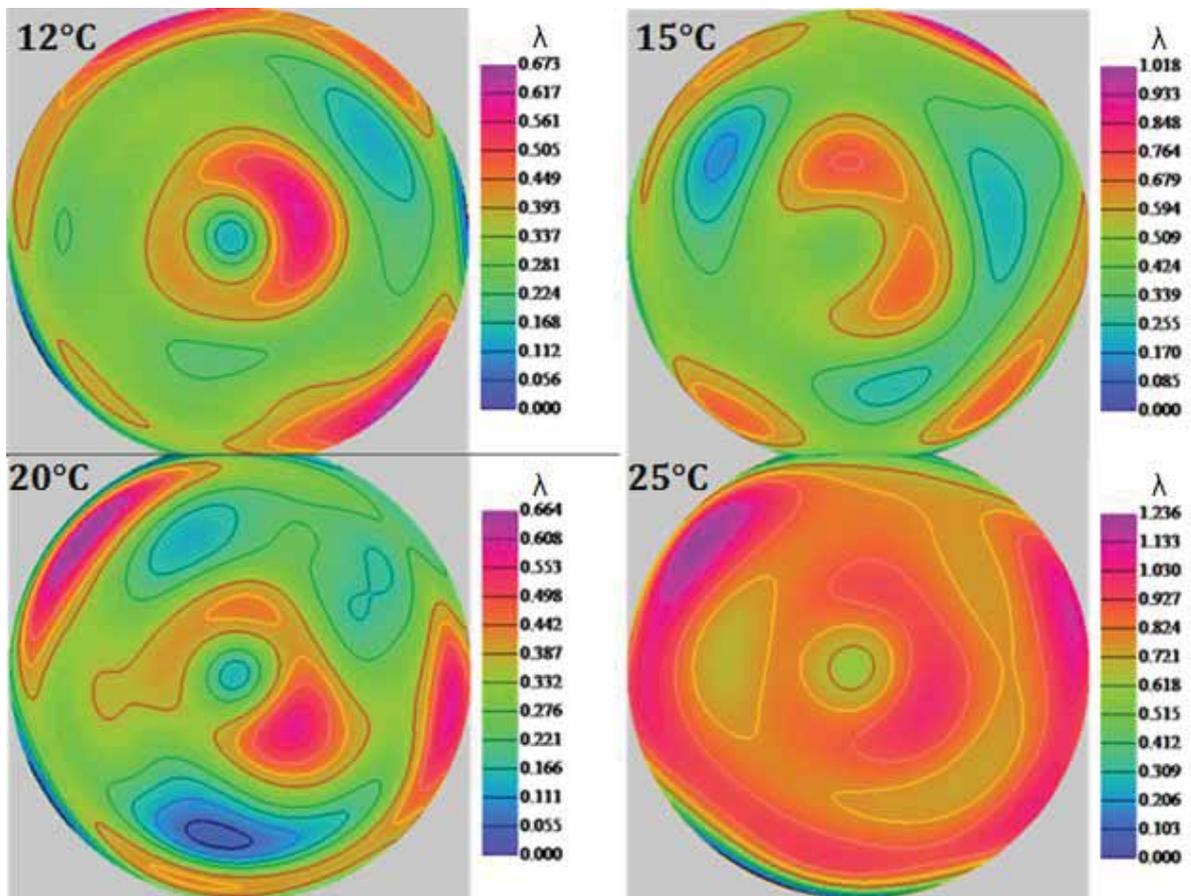


Figura 46 – Modificações na superfície do espelho P1 em diferentes temperaturas.

Através da figura 46 é possível verificar que mesmo sendo a diferença entre os picos e vales da temperatura de 12°C (0.673 λ) maior do que a 20°C (0.664 λ), em 12°C, o espelho possui a qualidade óptica superior, devido a uniformidade nos defeitos, fazendo com que a somatória de todos os defeitos da sua superfície seja menor que a 20°C. Isso pode ser visto na tabela 9, através do σ , que a 12°C é 0.095 λ e a 20°C é de 0.115 λ . Como a frente de onda possui menores deformações, o fator Strehl aumenta.

A deformação sofrida pelo espelho a temperatura de 25 °C fez com que a diferença entre seus picos e vales fosse de 1.236 λ . Mesmo com a diferença entre o P-V seja semelhante ao do espelho T1, o espelho P1 possui qualidade óptica superior, detectado na figura 46. Os defeitos nesse espelho estão concentrados em uma região pequena da sua

borda e, além disso, o valor de σ (0.138 λ), é superior ao do espelho T1 a 20°C (0.164 λ) ou ainda através do seu fator Strehl.

A temperatura de 15°C, o espelho P1 teve o mesmo comportamento do espelho T1, se contraindo mais do que o esperado para essa temperatura, com b a 15°C menor que a 12°C. Isso pode evidenciar que a camada de alumínio pode influenciar nas medidas, pois como o alumínio condutividade térmica maior com o ambiente que o vidro, a superfície refletora se contrai antes que o vidro, não tendo tempo para o centro do vidro se resfrie e se contraia junto com a superfície.

Para analisar o comportamento do espelho comercial com a variação da temperatura de medida, a tabela 11 é analisada.

Tabela 11 – Comportamento do espelho Comercial com a variação de temperatura.

Temperatura	Fator Strehl	σ (λ)	b
12°C	0.598 \pm 0.008	0.114 \pm 0.002	-1.312 \pm 0.059
20°C	0.592 \pm 0.011	0.114 \pm 0.009	-1.385 \pm 0.074
25°C	0.491 \pm 0.005	0.135 \pm 0.003	-1.481 \pm 0.021

O mesmo comportamento observado nos vidros Soda-Cálcicos ocorre no espelho a base de Boro-silicato, que também teve sua curvatura modificada deixando de ser hiperbólico e ficando mais próximo da curvatura parabólica como pode ser visto na tabela 11. Observamos a mudança de b , que a temperatura de 25°C é de -1.481 e a 12°C de -1.312. A figura 47 ilustra as deformações na superfície do espelho.

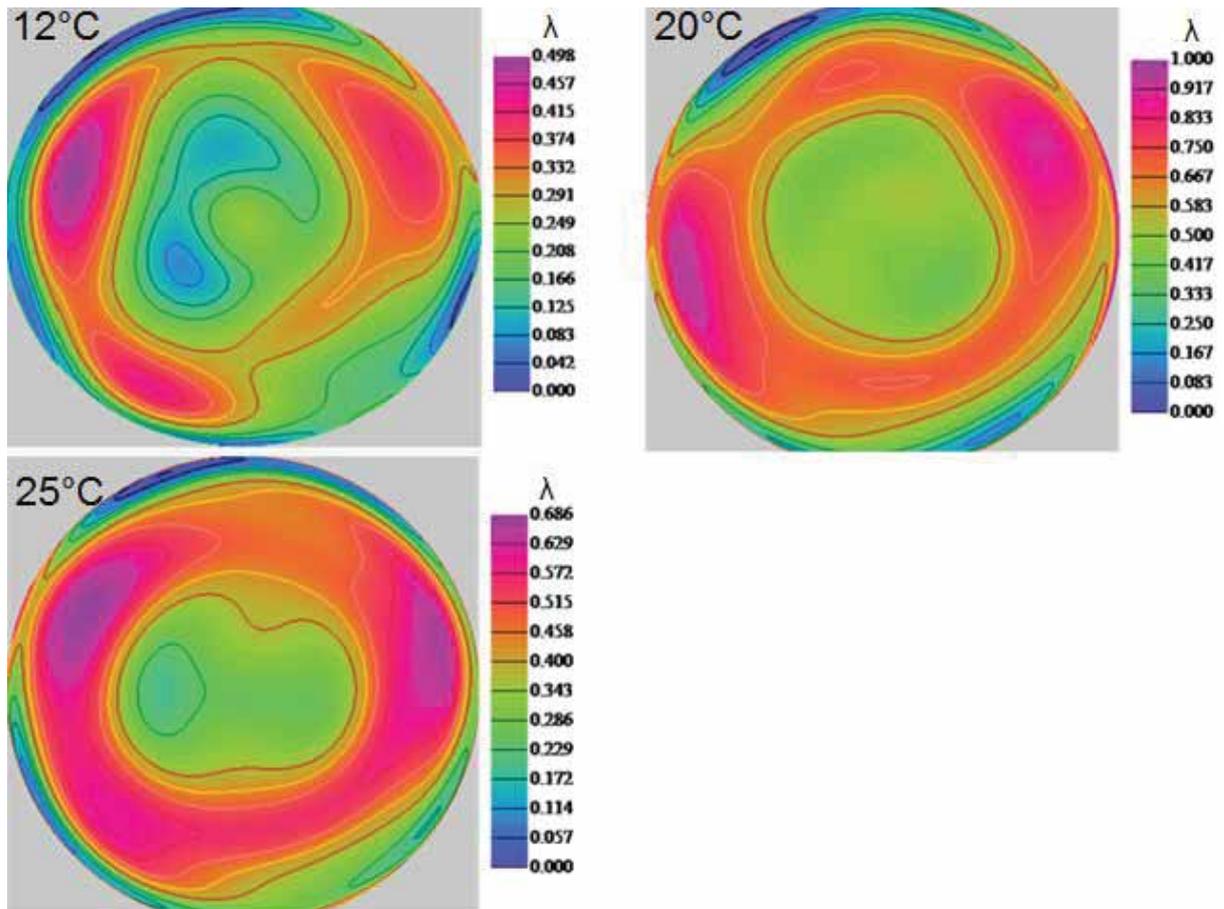


Figura 47 – Mapa de relevo do espelho comercial para a variação das medidas.

Mesmo com o espelho sofrendo uma variação de temperatura semelhante aos demais espelhos, seu comportamento foi muito distinto dos demais. Esse fato é observado nos valores de σ , onde os valores não sofrem grandes alterações, como ocorreu com os espelhos de base soda-cálcicos. Como não houve grandes variações nos seus valores de σ , seu fator Strehl não sofreu grandes alterações. Devido a esse comportamento ele pode ser considerado como sendo mais estável termicamente.

Com a diminuição da temperatura o espelho teve sua qualidade óptica melhorada como é possível ver no aumento do fator Strehl, esse comportamento é justificado devido ao defeito de borda rebaixada no espelho, com a diminuição da temperatura, os espelhos têm a tendência de contrair mais a superfície de alumínio, fazendo com que suas bordas sejam levantadas e seu centro rebaixado, essa característica fez com que esse defeito principal no espelho comercial fosse corrigido. Apesar dos outros espelhos terem seu defeito de borda caída (vale) corrigido a temperaturas mais baixas, eles também apresentam regiões com problemas de borda levantada (pico), essa tendência de subir a borda em baixas

temperaturas faz com que esse defeito seja acentuado, como pode ser visto no espelho T1 na figura 45.

Apesar do espelho Comercial ter um índice de dilatação muito inferior ao alumínio e ter uma dureza inferior ao vidro soda-cálcico a deformação na sua superfície foi muito inferior aos espelho no sistema soda-cálcico, mostrando que as maiores deformações são causadas devido ao gradiente de temperatura no vidro. Esse comportamento é justificado devido a qualidade em composição química sendo um espelho com menos modificadores de rede e com maior numero de formadores de rede. Como esse espelho possui a maior espessura, essa característica única do espelho pode ter auxiliado na resistência as deformações causadas pelo alumínio.

Ao analisarmos o espelho M1 nota-se a sensibilidade no uso do interferômetro à correntes de ar no ambiente do laboratório. Isso é indicado na tabela 12, onde os dados não possuem coerência com nenhuma outra medida realizada com os demais espelhos.

Tabela 12 – Comportamento do espelho M1 com a variação de temperatura.

Temperatura	Fator Strehl	σ (λ)	b
12°C	0.140 ± 0.108	0.222 ± 0.122	-0.898 ± 0.451
15°C	0.232 ± 0.21	0.192 ± 0.25	-0.504 ± 0.364
20°C	0.328 ± 0.182	0.169 ± 0.138	-0.743 ± 0.452
25°C	0.514 ± 0.065	0.129 ± 0.032	-0.182 ± 0.057

Em todas as medidas em que o laboratório não estava termicamente estável, como as realizadas as temperaturas de 12°C, 15°C e 20°C, quando a temperaturas externa e interna estavam variando (visto nas figuras 37, 38 e 39), as medidas realizadas não seguiram um padrão como observado anteriormente para os demais espelhos. Quanto menor a temperatura durante a medida, menor deveria ser **b**; entretanto, na temperatura mais baixa o espelho apresenta o maior **b** = -0.898 sendo o menor valor encontrado a 25°C, com **b** = -0.182.

A sensibilidade do equipamento à correntes de ar foi novamente observada nas medidas realizadas com a temperatura estável, conforme mostra a tabela 13.

Tabela 13 - Comportamento dos espelhos M1 a temperatura fixa de 16°C

Tempo	Fator Strehl	σ (λ)	b
20 h	0.416 ± 0.081	0.149 ± 0.054	-0.117 ± 0.036
28 h	0.188 ± 0.252	0.204 ± 0.176	-1.353 ± 0.541

Os valores apresentados na tabela 13 foram obtidos com o ambiente do laboratório isolado por 20 horas, para que a temperatura fosse estabilizada em 16°C. No momento da medida primeira medida, após 20h de ambiente termicamente estável, a temperatura externa ao laboratório estava próxima a temperatura interna, como mostra a figura 48. Quando realizada a segunda medida de interferometria com o ambiente fechado por mais 8 horas, totalizando 28 horas de ambiente fechado, a temperatura externa ao laboratório era de aproximadamente 10°C acima da temperatura interna, como mostra a figura 48.

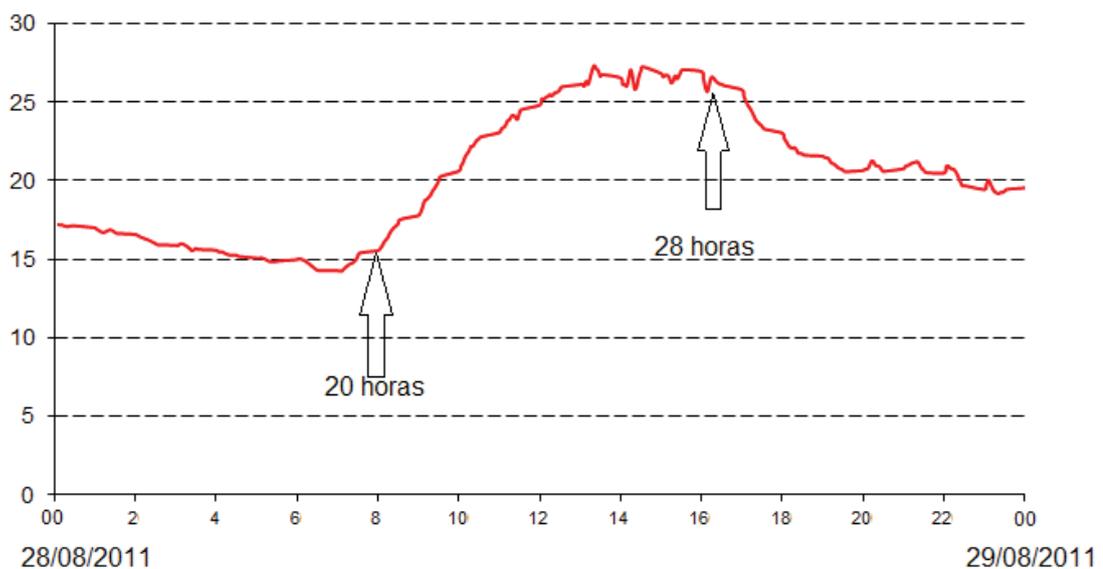


Figura 48 – Variação de temperatura externa ao laboratório durante o dia 28/08/2011.

Esse efeito do espelho M1 pode ser notado até mesmo nas fotos registradas na mesma medida. Para realizar a análise de todos espelhos, foram usadas três fotos de interferometria em cada medida. Entre os espelhos analisados anteriormente não tivemos grandes variações em seus desvio padrão, enquanto para o espelho M1, as diferenças entre os seus parâmetros (b , σ e fator Strehl) e seus desvios padrão são grandes se comparadas aos demais espelhos. Independentemente das fotos analisadas serem obtidas em um

intervalo curto de tempo, como dois segundos, ou em um intervalo longo, como três minutos, cada uma delas apresenta valores para seus parâmetros muito diferentes.

Esso comportamento é devido a frente de onda refletida pelos espelhos formar um cone de luz muito estreito, quanto maior o cone de luz menor a luminosidade do espelho, sendo a base desse cone o diâmetro de abertura do espelho e sua altura o raio de curvatura da superfície. Na tabela 14 estão as bases e altura dos respectivos cones de luz de cada espelho analisado.

Tabela 14 – Cone de luz formado pelos espelhos analisados

Espelhos	Base (cm)	Altura (cm)
M1	19	386
T1	19	282
P1	23	234
Comercial	20	247

Ao analisarmos os cones de luz formados pelos espelhos, é possível ver que o cone de luz do espelho M1 possui uma altura superior aos demais (3,86 metros) e uma base semelhante aos demais espelhos (19 centímetros), formando um cone de luz mais estreito que os demais. Devido a esse cone estreito, qualquer corrente de ar que passe por ele, principalmente próxima ao interferômetro, afeta a frente de onda refletida pelo espelho, ocasionando defeitos não existentes em grande parte da sua superfície, enquanto para os demais espelhos inserem apenas erros locais. Este comportamento é evidenciado no espelho T1 que possui o segundo maior cone de luz, devido a isso um desvio padrão maior que os espelhos P1 e Comercial.

Devido a esse comportamento instável do espelho M1 nas medidas em função da temperatura, associado ao longo caminho percorrido pela frente de onda e de seu cone de luz mais estreito do que os outros espelhos, o mesmo não foi utilizado nas medidas subsequentes.

4.2. Medidas de interferometria com estabilização da temperatura

Os espelhos P1 e Comercial, com a temperatura estável no laboratório em 16°C tiveram um padrão de comportamento semelhante, como mostra a tabela 15, quando permaneceram no laboratório por 20 e 28 horas antes das medidas.

Tabela 15 – Comportamento dos espelhos T1, P1 e Comercial a temperatura de 16°C.

Tempo	Fator Strehl	σ (λ)	b
Espelho T1			
20 h	0.116 \pm 0.042	0.232 \pm 0.013	-1.320 \pm 0.098
28 h	0.535 \pm 0.076	0.125 \pm 0.029	-1.063 \pm 0.116
Espelho P1			
20 h	0.582 \pm 0.033	0.117 \pm 0.018	-1.018 \pm 0.082
28 h	0.521 \pm 0.014	0.128 \pm 0.009	-0.851 \pm 0.109
Espelho Comercial			
20 h	0.471 \pm 0.023	0.138 \pm 0.016	-1.439 \pm 0.079
28 h	0.427 \pm 0.011	0.147 \pm 0.009	-1.417 \pm 0.056

Analisando a curvatura entre os espelhos, todos tiveram o mesmo comportamento de modificar a curvatura. Entretanto, o espelho feito de vidro Boro-silicato teve uma deformação menor que os espelho P1 e T1, sendo que sua curvatura de $b = -1.439$ modificou para $b = -1.417$, enquanto o espelho P1 passou de $b = -1.018$ para $b = -0.851$, o espelho T1 teve uma deformação maior em relação aos demais espelhos, tanto em $b = -1.320$ para $b = -1.063$, como nos demais parâmetros analisados, enquanto os espelhos comercial e P1 tiveram comportamentos semelhantes com pouca variação dos parâmetros Strehl e σ , esse comportamento pode ser devido a defeitos na base do espelho ou o gradiente de composição do mesmo.

Ao analisarmos a somatória dos defeitos gerados na superfície verificamos que o espelho a base de boro silicato se manteve novamente mais estável que os espelhos de vidro soda-cálcicos. O σ sofreu uma variação menor que os demais espelhos, apesar do espelho P1 ter uma óptica melhor, a variação do seu fator foi maior que o Comercial que variou de 0.138λ para 0.147λ , enquanto o espelho P1 teve uma variação de 0.117λ para 0.128 . Portanto, mesmo possuindo uma espessura superior ao espelho P1 e devendo sofrer mais com o gradiente de temperatura do vidro o espelho comercial se manteve mais estável, esse comportamento é justificado pelo baixo coeficiente de dilatação do mesmo, devido a maior concentração dos formadores de rede em sua composição, podendo afirmar que em ambiente termicamente estável o espelho de sistema Boro- silicato é termicamente mais estável que os do sistema Soda-cálcicos.

4.3. Medidas de interferometria para espelhos mantidos na posição vertical

Uma condição comum que pode afetar a qualidade óptica dos espelhos é a utilização dos mesmos na vertical como mostrado na figura 40. Sofrendo ação do seu próprio peso, se o vidro tiver pouca rigidez, ele modificará sua curvatura. Como os espelhos são utilizados em telescópios, em seu uso diário quando o telescópio mirar para algum objeto próximo ao horizonte, seu espelho primário ficará na posição vertical, e a relação 32 de A. Couder, diz que quanto mais fino o espelho maior será sua deformação. Para avaliar possíveis alterações na superfície dos espelhos foram realizadas as medidas de interferometria com os espelhos nessa posição pelos intervalos de tempo de 24 e 48 horas. Os resultados obtidos para os espelhos T1, P1 e Comercial estão na tabela 16.

Tabela 16 – Resultados de interferometria obtidos para os espelhos T1, P1 e Comercial mantidos na posição vertical por 24 e 48 horas a 16°C.

Tempo	Fator Strehl	σ (λ)	b
Espelho T1			
24h	0.285 \pm 0.062	0.178 \pm 0.037	-1.201 \pm 0.116
48h	0.397 \pm 0.073	0.153 \pm 0.069	-1.087 \pm 0.148
Espelho P1			
24h	0.489 \pm 0.013	0.135 \pm 0.009	-0.887 \pm 0.089
48h	0.628 \pm 0.021	0.108 \pm 0.011	-0.862 \pm 0.073
Espelho Comercial			
24h	0.452 \pm 0.026	0.140 \pm 0.032	-1.403 \pm 0.068
48h	0.503 \pm 0.030	0.131 \pm 0.014	-1.364 \pm 0.047

Com os espelhos na vertical os mesmos começam modificar sua curvatura como visto em b na tabela 16. O espelho P1, segundo a relação de A. Couder deveria ser o espelho com a maior deformação, devido a ser o espelho com menor relação espessura em relação ao diâmetro. Entretanto, foi o espelho que sofreu a menor alteração em sua curvatura, sendo que $b = -0.887$, passou para $b = -0.862$, lembrando que o espelho praticamente não alterou sua curvatura da medida realizada anteriormente, a temperatura fixa de 16°C. Apesar do espelho P1 não alterar sua curvatura, não é possível afirmar que ele teve um desempenho superior do que o espelho composto pelo vidro Boro-silicato. Ao analisarmos a somatória dos erros, o σ do espelho, é possível ver que ocorreu uma grande variação, de 0.135 λ para 0.108 λ . Apesar de a superfície ter melhorado a qualidade óptica, como é visto no fator Strehl, isso não significa um resultado bom para o espelho, pois ele poderia ter afetado de maneira negativa a superfície do espelho. Um bom resultado seria a estabilidade do espelho ao efeito da gravidade. Uma possibilidade para que a curvatura não tenha sido alterada é as presilhas que podem ter forçado as bordas do espelhos, impedindo que ele ficasse com a curvatura mais fechada, diminuindo o valor de b .

O espelho T1, teve a maior deformação na curvatura, visto em $b = -1.201$ para $b = -1.087$, essa deformação é notada também no seu fator de σ , variando de 0.178 λ para 0.153 λ , e no seu fator Strehl, variando de 0.285 para 0.397, sendo um valor menor que o espelho

P1, podendo ser a comprovação da relação de A. Couder, como na medida realizado o vidro não estava em contato direto com seu suporte, sendo seguro apenas pelas 3 travas de segurança, o vidro pode sofrer as deformação livre da influência do se suporte.

O espelho Comercial sofreu o mesmo efeito que os espelhos anteriores. Entretanto, teve um desempenho melhor que os demais, pois sua curvatura foi pouco afetada apresentando $b = -1.403$ para $b = -1.364$, sendo este um valor intermediário entre os espelhos soda-cálcicos. Apesar de ter um valor intermediário na deformação da curvatura, é possível ver através dos demais parâmetros a superioridade desse material. A somatória dos erros no espelho foi menor que os demais, quando σ variou de 0.140λ para 0.131λ , e seu fator Strehl que variou de 0.452 para 0.503 , sendo essa uma variação menor que a dos demais espelhos.

Mesmo com todos os espelhos melhorando sua qualidade óptica como é visto na tabela 16, com o aumento do fator Strehl, essa modificação da superfície não é um comportamento bom para a superfície dos espelhos. Um bom resultado para os espelhos seria que seus parâmetros permanecessem inalterados. Apesar dos espelhos terem deformado quando colocados na vertical, essa variação não é tão acentuada a ponto de afetar a qualidade óptica do espelho durante seu uso diário.

4.4. Deformações devido ao peso do espelho

As medidas para avaliar o efeito da gravidade nos espelhos apoiados pelas bordas foram realizadas apenas para os espelhos T1 e Comercial, uma vez que o espelho P1 é utilizado para atendimento de escolas e público no Observatório de Astronomia Lionel José Andriatto da UNESP e os efeitos da medida poderiam comprometer permanentemente a qualidade óptica do equipamento. As medidas foram realizadas apoiando os espelhos apenas por dois pontos laterais como mostra a figura 41. A deformação dos espelhos é apresentada na tabela 17.

Tabela 17 – Resultados obtidos para os espelhos T1 e Comercial, apoiados pelas bordas durante 24 e 48 horas, com temperaturas mantidas a 16°C.

Tempo	Fator Strehl	σ (λ)	<i>b</i>
Espelho T1			
24h	0.179 ± 0.113	0.208 ± 0.085	-1.065 ± 0.134
48h	0.389 ± 0.095	0.153 ± 0.041	-0.929 ± 0.122
Espelho Comercial			
24h	0.306 ± 0.044	0.172 ± 0.019	-1.384 ± 0.043
48h	0.547 ± 0.032	0.123 ± 0.011	-1.309 ± 0.072

Apoiando os espelhos apenas por dois pontos da borda, verificamos as variações dos seus parâmetros são próximas. As deformações mais significativas na superfície dos espelhos foram nas regiões em que os espelhos foram apoiados, com a criação de picos nessas regiões.

O espelho T1 teve a maior deformação como pode ser visto de maneira qualitativa na figura 49, mostrando que o espelho de Soda-Cálcico é menos rígido que o Boro-silicato aos efeitos da gravidade, esse comportamento é devido a espessura dos espelhos, mesmo o vidro Soda-Cálcico sendo mais rígido que o Boro-silicato, o espelho comercial possui uma espessura praticamente duas vezes maior que o T1, sendo assim, apresentando uma deformação menor que esta relacionada a espessura do espelho, como pode ser visto na relação de A. Couder, quanto menor a espessura do espelho em relação ao seu raio de abertura, maior são as deformações sofridas pelo mesmo.

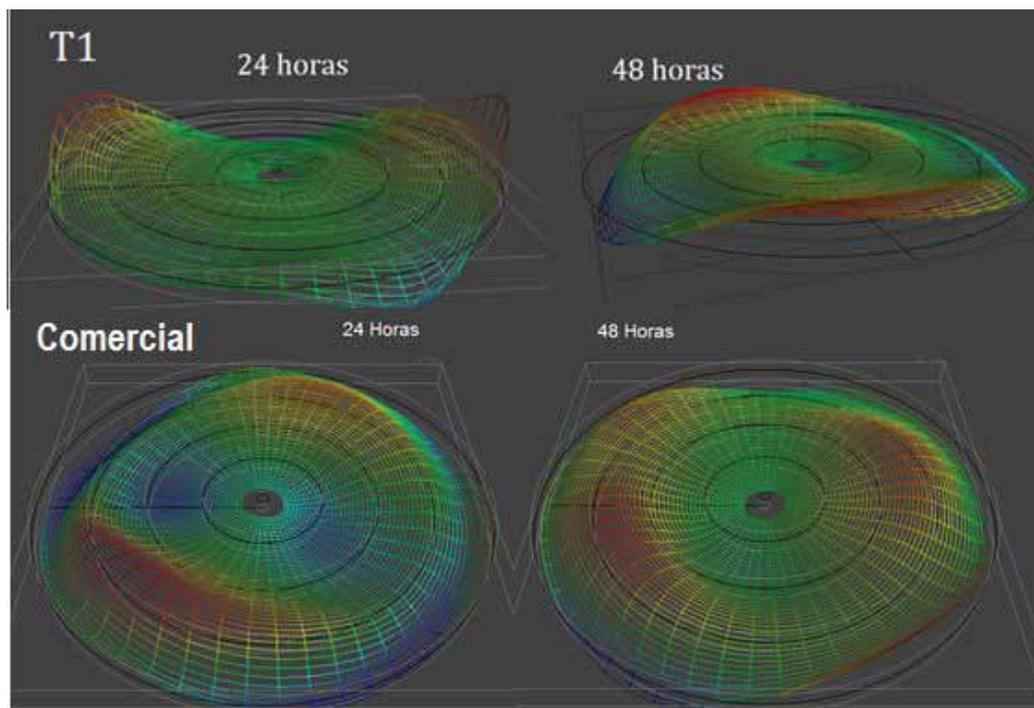


Figura 49 – Representação da superfície 3D dos espelhos T1 e Comercial apoiados por dois pontos da borda durante 24 e 48 horas

O espelho T1 teve a formação de dois grandes picos nas bordas apoiadas, observados em vermelho na figura 49, quando submetido a medida depois de 24 horas nesta posição. O espelho Comercial formou dois pequenos picos próximos a borda, como pode ser visto em vermelho na figura 49, também quando submetido a medidas após 24 horas. Entretanto, seu resultado foi melhor em comparação ao espelho de T1. Apesar de ambos sofrerem com a deformação elástica o vidro de boro-silicato deformou menos sua superfície como pode ser visto com o não aparecimento de grandes picos.

Quando a posição dos espelhos foi modificada e os mesmos foram apoiados por suas bordas rebaixasadas, a qualidade dos espelhos melhorou como visto na tabela 16, com a diminuição nos erros da frente de onda o parâmetro σ dos espelhos aumentou e consequentemente houve um aumento do fator Strehl. Na figura 49 conseguimos analisar de maneira qualitativa que os picos na borda do espelho T1 e Comercial foram amenizados. Esse recurso de apoio pode ser usado como uma solução para defeitos de borda rebaixasada.

Através da análise das franjas de interferometria, associada aos polinômios de Zernike conseguimos reproduzir a imagem dos espelhos em 3D. Nas figuras 50, 52, 54 e 56

são mostrados as imagens em 3D montadas da superfície dos espelhos e nas figuras 51, 53, 55 e 57 são apresentadas as franjas de interferometria captada pela *webcam*.

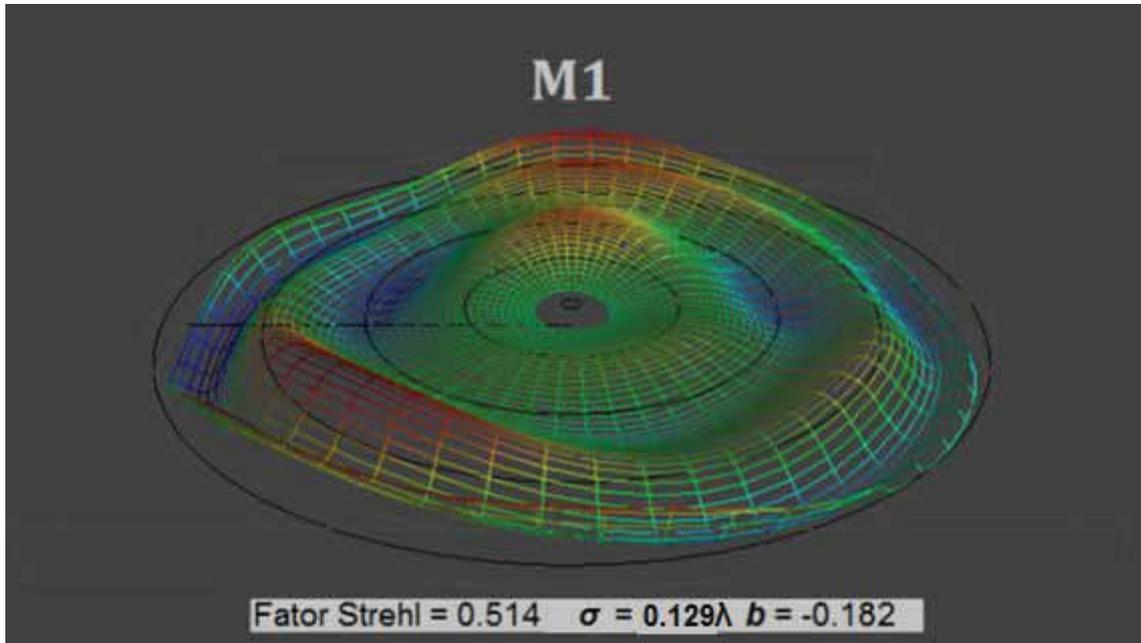


Figura 50 – Reprodução do espelho M1 em 3D.

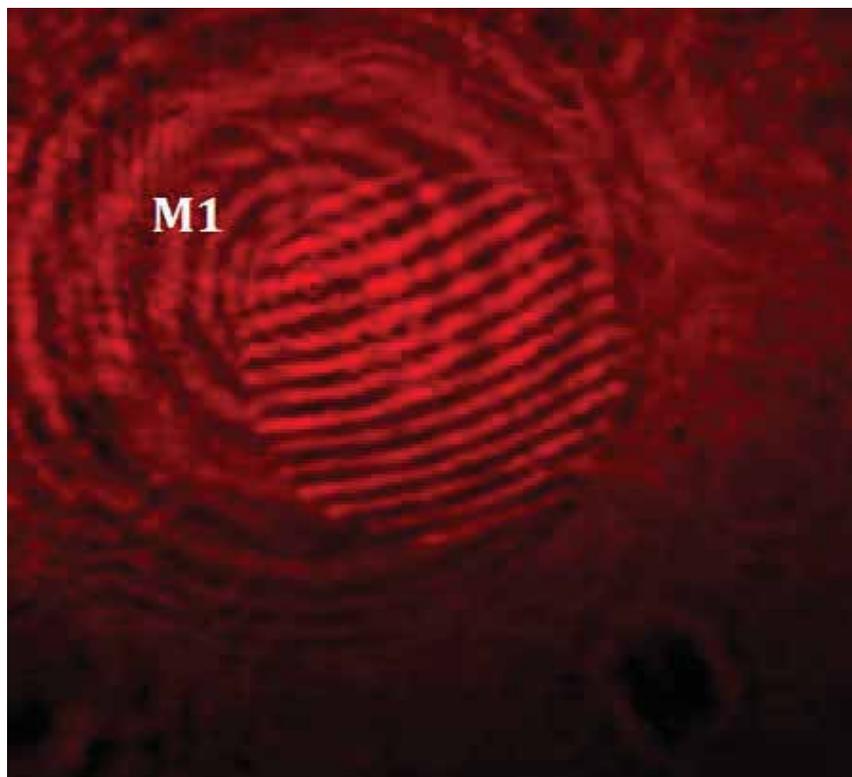


Figura 51 – Imagem de interferometria do espelho M1

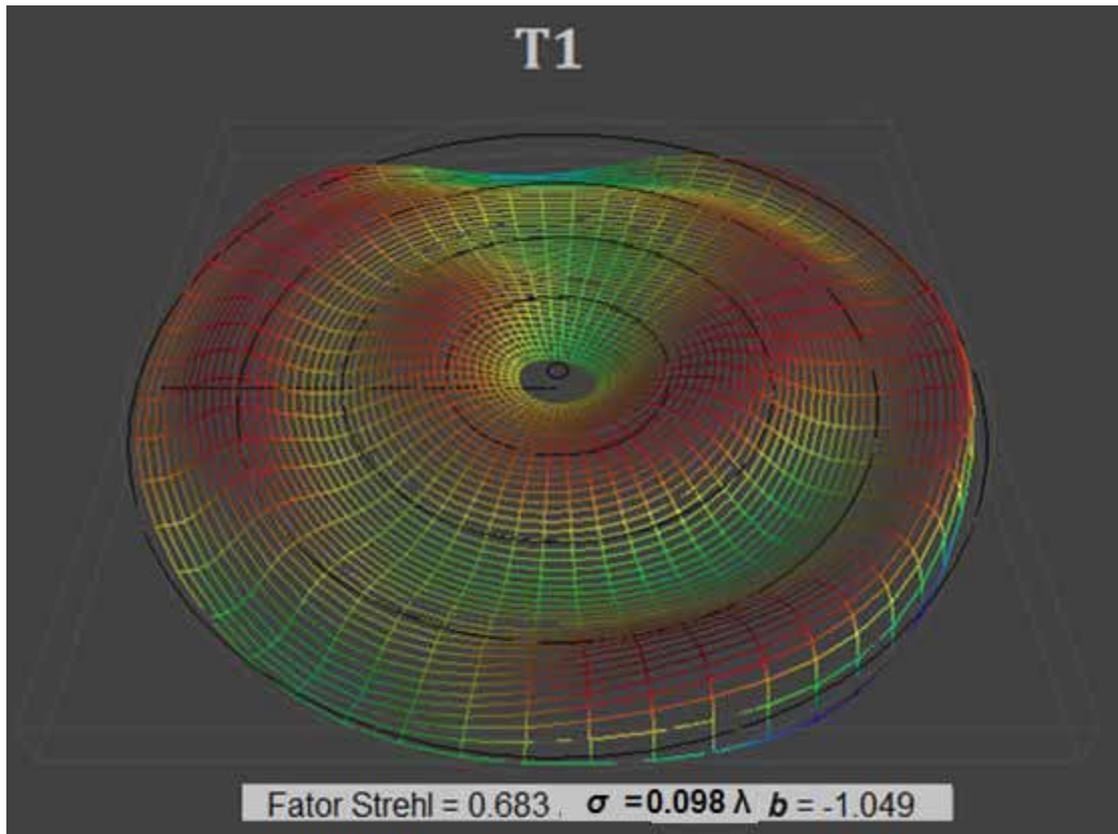


Figura 52 – Reprodução do espelho T1 em 3D.

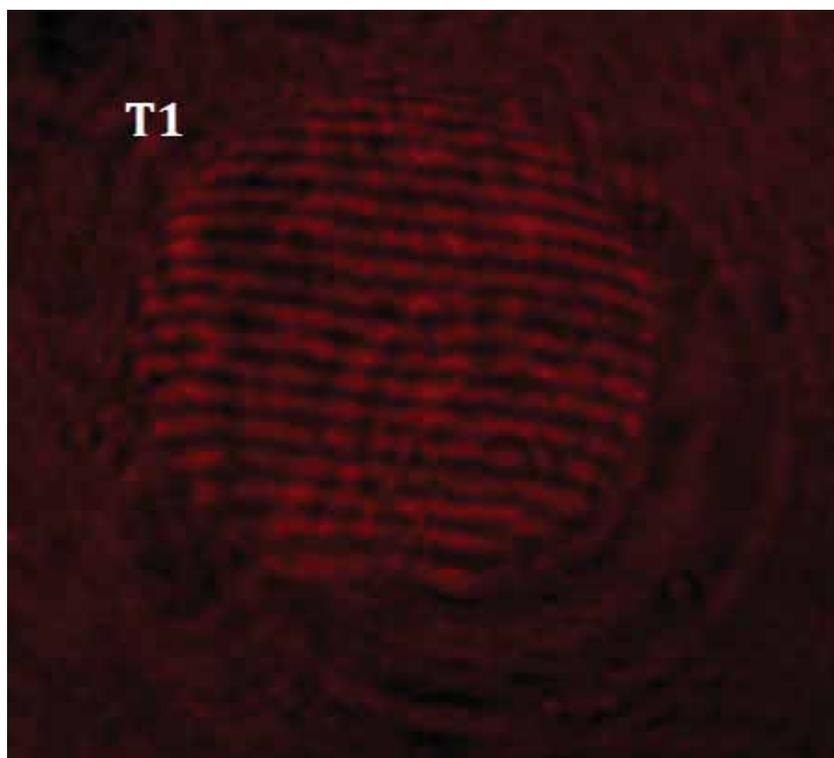


Figura 53 – Imagem de interferometria do espelho T1.

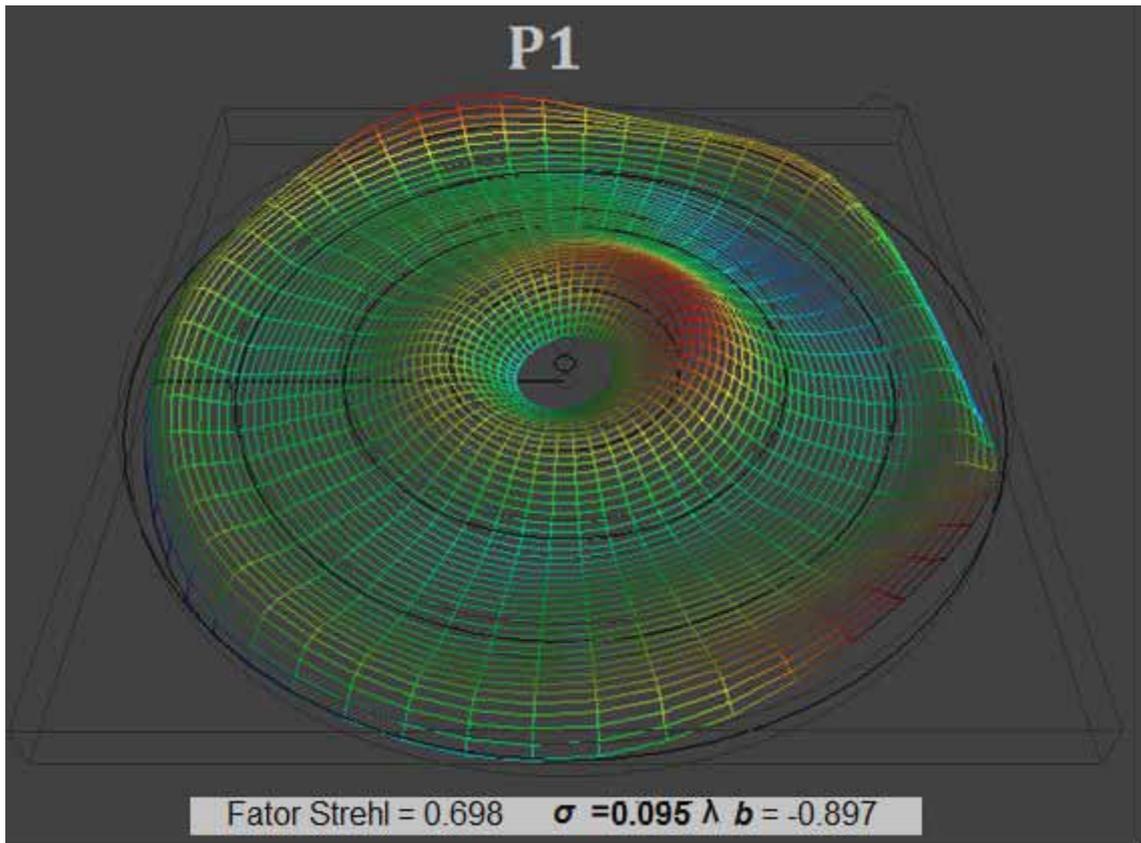


Figura 54 – Reprodução do espelho P1 em 3D.

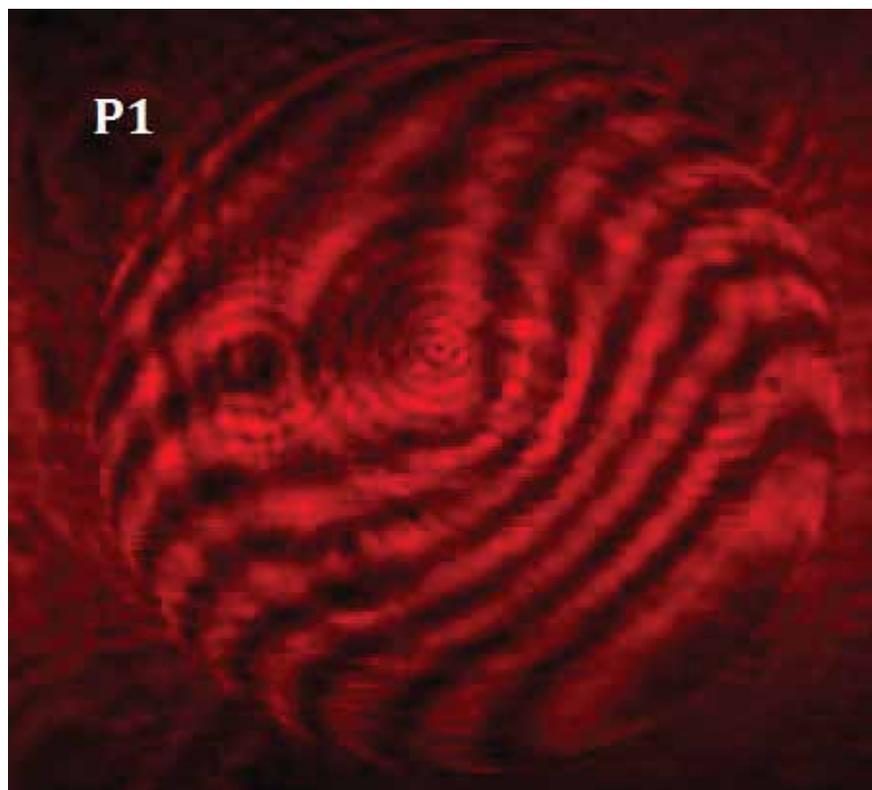


Figura 55 – Imagem de interferometria do espelho P1.

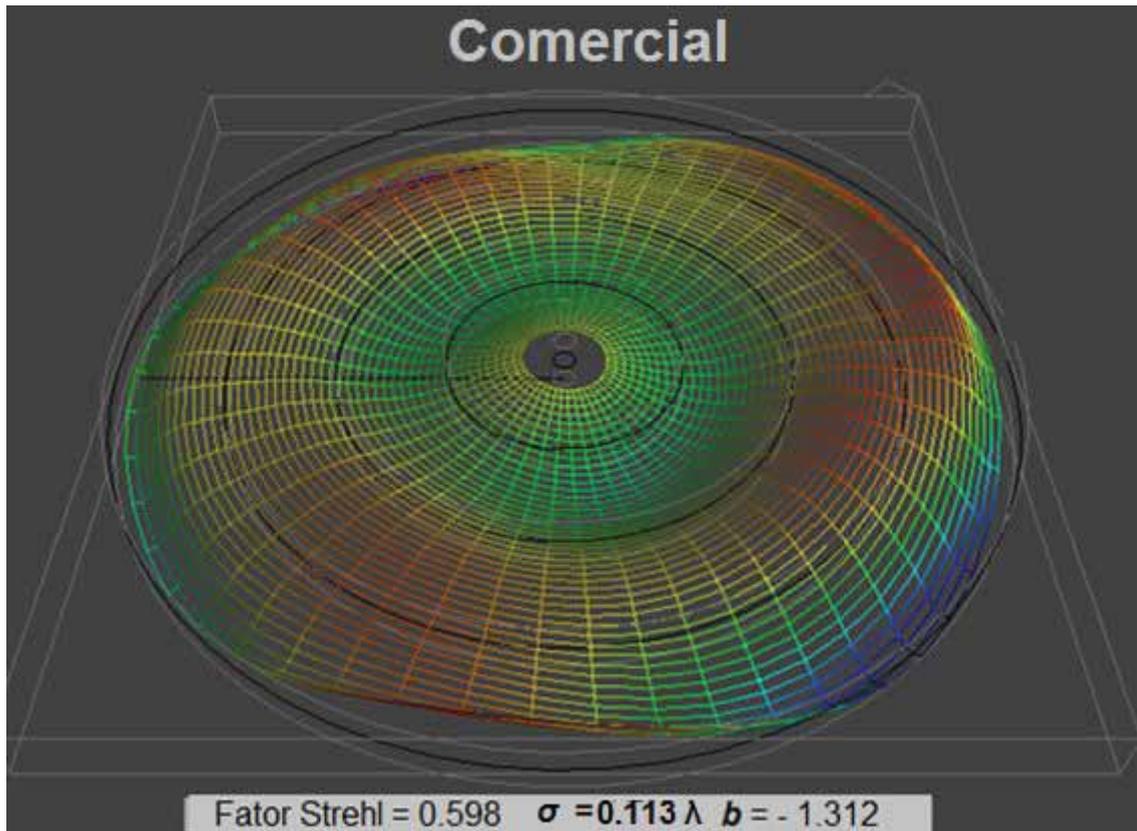


Figura 56 – Reprodução do espelho Comercial em 3D.

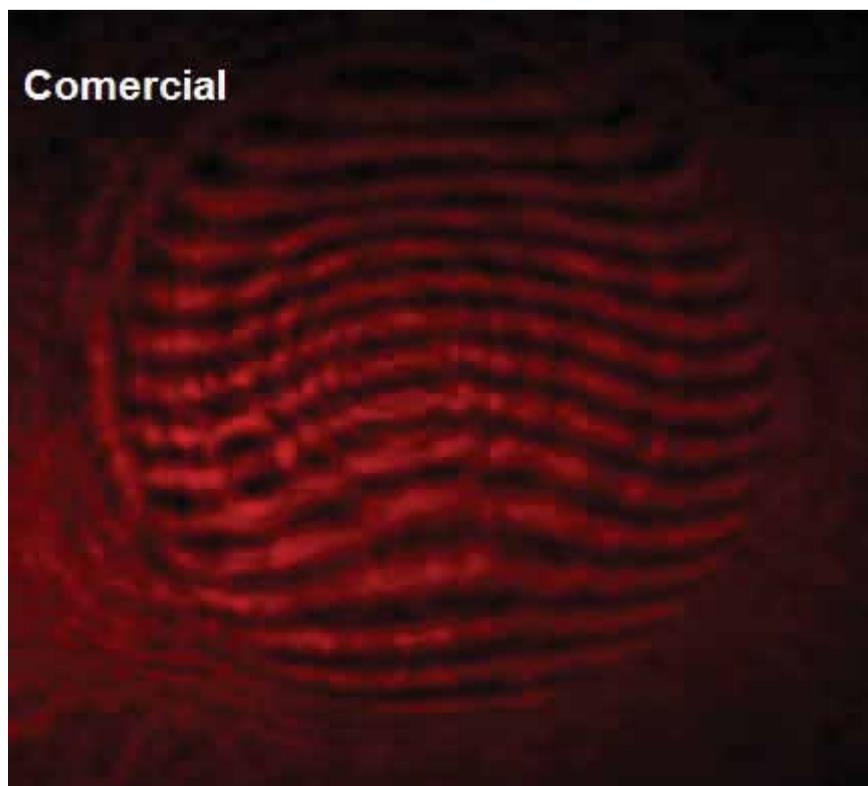


Figura 57 – Imagem de interferometria do espelho Comercial.

Com as análises por interferometria dos espelhos M1, T1 e P1, foi possível visualizar um defeito causado na correção dos espelhos, devido a utilização do teste de Foucault associado a máscara de A. Couder vista na figura 58.

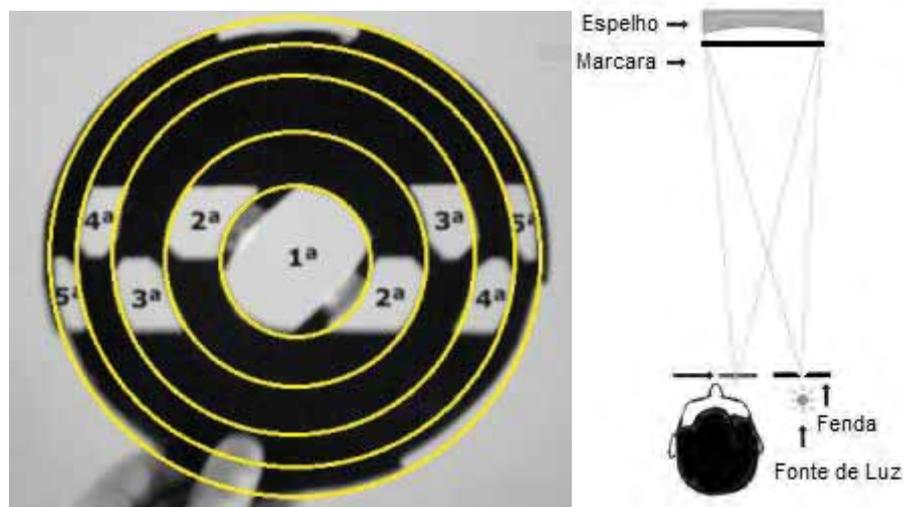


Figura 58 – A esquerda a máscara de A. Couder com cinco zonas e sua utilização no teste de Foucault a direita. Figura adaptada [33].

Através da figura 58 conseguimos visualizar as zonas regiões circulares concêntricas na máscara de A. Couder, numeradas de 1 a 5. Através da análise na bancada de Foucault associada a máscara de A. Couder, é possível controlar a curvatura do espelho, entretanto, como a correção da curvatura é feita por regiões isoladamente, pode surgir o efeito de ondulação na superfície do espelho, esse fenômeno é visto com grande intensidade no espelho M1 na figura 50, onde a superfície do espelho possui 5 regiões circulares concêntricas alternando-se entre picos e vales. O teste com a máscara de A. Couder é detalhado no Anexo 1.

4.5. Composição Química e Estrutura

A composição química obtida através de medidas de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X, do vidro que dá origem ao espelho T1 é apresentada na tabela 18.

Tabela 18 – Composição química em % de massa do vidro soda-cálcico do espelho T1 e vidro soda-cálcico obtido na literatura [1].

Componentes Químicos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	TiO ₂	K ₂ O	CaO	MgO	BaO	SO ₃	FeO
Vidro Literatura [1]	71%	1%	-	13,5%	-	0,5%	10%	4%	-	-	-
Espelho T1	71,1%	0,88%	0,104%	14%	0,029%	0,2%	9,45%	3,9%	<0,01%	0,26%	0,03%

Os métodos de fabricação dos vidros fazem com que a composição química sofra algumas variações. No vidro que originou o espelho T1, são observados alguns componentes que não estão presentes em amostras da literatura, e que provavelmente são provenientes de matérias primas contaminadas. Para verificar a estrutura amorfa do vidro do espelho T1 se foi realizada a análise de Difração de Raios X, pelo método do pó o resultado da difração resultou em um gráfico semelhante ao visto na figura 44, não apresentando nenhum pico característico de estrutura cristalina. Analisando a parte mais alta do gráfico do vidro, conseguimos analisar que está localizado na mesma posição do que o pico mais intenso no difratograma do Quartzo Alfa, isso demonstra que a curto alcance atômico o principal componente do vidro (sílica) e Quartzo, possuem a mesma forma [32].

5. Conclusões

Através das análises por interferometria foi possível avaliar que os espelhos obtidos de maneira artesanal no Observatório da UNESP, com exceção do espelho M1, possuem qualidade óptica semelhante a um espelho comercial. Entretanto, o vidro de Boro – silicato, matéria prima utilizada para a construção do espelho Comercial, possui uma variação dos parâmetros menor que o vidro Soda – Cálcico, utilizado como matéria prima para os espelhos artesanais. Isso faz com que o espelho Comercial tenha uma estabilidade superior aos espelhos artesanais quando no uso diário.

A associação de todos os componentes das bases dos espelhos utilizados podem influenciar nas medidas, com as presilhas forçando regiões da borda do espelho para baixo, formando regiões com vales, e a superfície plana de madeira podendo entortar com o tempo e forçar o espelho, produzindo deformações elásticas, como foi visto no espelho T1.

Movimentações de ar no laboratório influenciam na qualidade das medidas, inserindo erros nas medidas, principalmente em espelhos com grandes distâncias focais como foi possível verificar no espelho M1, para o qual a variação dos parâmetros de curvatura, σ e do fator Strehl não seguiram um comportamento semelhante aos demais espelhos.

A temperatura constante de 16°C, o espelho Comercial também se apresentou mais estável, mantendo os parâmetros com variações menores que nos demais espelhos, mesmo possuindo um gradiente de temperatura superior aos demais por ser mais espesso. Esse comportamento é devido a grande quantidade de formadores de rede como SiO_2 e B_2O_3 .

Os espelhos posicionados na vertical, o parâmetro proposto por A. Couder é observado no espelho P1, sendo o espelho com a maior relação entre raio do espelho e espessura, entre os espelhos analisados, apesar da curvatura do espelho P1 ser a que menos alterou na medida, seu σ e fator Strehl sofreram grandes variações, sendo o espelho com maior deformação elástica quando posicionado na vertical. Apesar de todos os espelhos melhorarem sua qualidade óptica como pode ser visto na diminuição do σ e aumento do fator Strehl, esse efeito não é adequado para os espelhos. Resultados positivos para essas medidas seriam não alterar os valores dos parâmetros analisados.

Quando os espelhos foram apoiados apenas pelas bordas, sofreram deformações na curvatura, no σ e no fator Strehl. Entretanto, a maior deformação foi local, na região onde os espelhos foram apoiados e novamente o espelho produzido com vidro boro-silicato teve um resultado superior do que o de soda-cálcico, mesmo o vidro de soda – cálcico sendo mais rígido que o boro-silicato, devido a espessura do espelho comercial seu resultado superior, mostrando a importância da espessura do espelho. Esse efeito de deformação elástica pode ser utilizado para correção de defeitos de bordas caídas, uma vez que nas medidas realizadas com os espelhos apoiados pelas bordas caídas, a qualidade óptica dos espelhos melhoraram, detectada através da diminuição dos σ dos espelhos e no aumento do fator Strehl.

Verificou-se que os espelhos produzidos artesanalmente possuem uma qualidade óptica semelhante ou até mesmo superior ao exemplar do espelho Comercial utilizado, porém, o objetivo principal do trabalho é comparar o desempenho dos materiais que são feitos os espelhos e não a qualidade óptica do mesmo, portanto, esses parâmetros de comparação, são dados através da variação dos parâmetros ópticos do espelho, variação dos valores de curvatura (b), σ e fator Strehl, em situações que os espelhos passam durante sua utilização. Deste modo, o vidro de boro-silicato apresentou um desempenho melhor em todas as análises em relação ao vidro de soda-cálcico, sendo um vidro mais estável a temperatura e aos efeitos da gravidade, portanto, sendo melhor para a construção de espelhos côncavos de médio porte.

Com a construção do interferômetro de Bath a sensibilidade em que é possível realizar as análises de espelhos côncavos por inteiro. Sendo possível realizar correções mais precisas e conseqüentemente aumentar a qualidade óptica dos equipamentos produzidos artesanalmente no Observatório Didático de Astronomia Lionel José Andriatto, além de beneficiar outros Observatórios e construtores de telescópios que poderão utilizar o equipamento para análises.

6. REFERÊNCIAS

- [1] NAVARRO, J. M. F. *El Vidrio*. 3ª ed. Madri. Consejo Sup. de Investigaciones Científicas. Sociedade Española de Cerámicas y vidrio. 2003.
- [2] AKERMAN, M. *Evolução das Composições dos Vidros Industriais*. 55º Congresso Brasileiro de Cerâmicas. Porto de Galinhas. Anais CD-ROM. 2011.
- [3] KING, H. C. *The History of the Telescope*. Cambridge. Charles Griffin and Company Ltd. 1955.
- [4] TEXERAU, J. *How to Make a Telescope*. 2ª Ed. Richmond. Willman-Bell. 1984.
- [5] AKERMAN, M; TOFFOLI, S. M; GOLBEA, D. *Escola do vidro: Natureza, Estrutura e Propriedades do Vidro*. São Paulo. 2009.
- [6] VICENTE, F.S.; RUBO, E.A.A.; SIU LI. M. *Construction of an evaporation system for film deposition via resistive and electron beam sources*. Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo, v. 23, n. 1, 11-16, 2004.
- [7] HALLIDAY, D.; RESNICK, R. Walker, J. *Fundamentos de Física, Volume 2: Gravitação, Ondas e Termodinâmica*. 6ª ed. Rio de Janeiro. LTC. 2002.
- [8] NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de Física Básica 2 – Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor*. 1ª Ed. Rio de Janeiro. Edgard Blucher. 1998.
- [9] Tipler, P.A. *Física - Mecânica, Oscilações e ondas, Termodinâmica*. Editora LTC, 4ª ed., vol.2, 2000.
- [10] SCHERMAN, J; VIOLA, A.H., *Construcción de Telescopios: Manual del Aficionado*. Buenos Aires. Asociacion Argentina de Astronomia. 1960.

- [11] HALLIDAY, D.; RESNICK, R. WALKER, J. *Fundamentos de Física, Volume 4: Óptica e Física Moderna*. 8ª Ed. Rio de Janeiro. LTC. 2009
- [12] NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de Física Básica 2 – Óptica, Relatividade e Física Quântica*; 1ª Ed. Rio de Janeiro. Edgard Blucher. 1998.
- [13] Tipler, P.A. *Física eletricidade e magnetismo, óptica*. Editora LTC, 4ª ed., vol.2. 2000.
- [14] MICHELSON, A.; MORLEY, E. W. *On the Relative Motion of the Earth and The Luminiferous Ether*. American Journal of Science, 203. Vol. XXXIV. 1887
- [15] MAIMAN, T. H. *Optical and Microwave – Optical Experiments in Ruby*. Physical Review Letters. Vol 04. N 11. California. Pag 564 – 566. 1960.
- [16] BATH, K.L.; *Ein einfache Interferometer zur Prufung astronomischer Optik*. Sterne und Weltraum. Pag 177 – 180. 1973.
- [17] BORN, M. WOLF, E. *Principles of Optics – Eletromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. 7ª ed. Cambridge University Press. 2002.
- [18] WYANT, J. C. *Basic Wavefront Aberration Theory for Optical Metrology. Applied Optics and Optical Engineering*. Vol XI. Arizona. Academic Press. Pag 28-39. 1992.
- [19] WYANT, J. C. *Kraus Java LiveGraphics3D*. Acessada em 22 de Dezembro de 2011.
<http://www.optics.arizona.edu/jcwyant/Zernikes/LiveGraphics3D/livegraphics3d.htm>
- [20] SCHROEDER, D. J. *Astronomical Optics*. 2ª Ed. Academic Press. 2000.

[21] ROWE, D. *Interferometry and Fringe Analysis*. Atualizada em 29 de Maio de 2004. Acessada em 20 de Junho de 2011. <http://www.atmsite.org/contrib/Rowe/bath/rtmc04/img0.html>

[22] WYANT, J. C. *Introduction to Interferometric Optical Testing*. Acessada em 10 de Janeiro de 2012. http://www.optics.arizona.edu/jcwyant/Short_Courses/SPIEOpticalTesting/Interferometric%20Optical%20Testing.pdf

[23] ROWE, D. *Aberrations in the Bath Interferometer*. Atualizada em 27 Abril 2008. Acessada em 20 de Junho de 2011. [http://starryridge.com/mediawiki-1.9.1/index.php?title=Aberrations in the Bath Interferometer](http://starryridge.com/mediawiki-1.9.1/index.php?title=Aberrations_in_the_Bath_Interferometer)

[24] OLIVEIRA, K. S. F.; OLIVEIRA, M. F. *Astronomia e Astrofísica*. Instituto de Física Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre 2003.

[25] BERNARDES, T. O.; BARBOSA, R. R.; IACHEL, G.; BATAGIN N. A.; PINHEIRO, M. A. L.; SCALVI, R. M. F. *Abordando o ensino de óptica através da construção de telescópios*. Revista de Ensino de Física. v. 28. p. 391-396. 2006.

[26] IACHEL, G.; BACHA, M. G.; PAULA, M. P.; SCALVI, R. M. F. *A montagem e a utilização de lunetas de baixo custo como experiência motivadora ao ensino de Astronomia*. Revista de Ensino de Física v. 31, p. 4502-1-4502-7. 2009.

[27] *Instruction Manual 8", 10", 12", 16" LightBridge™ Truss Tube Dobsonian Telescopes*. Acessada em 25 de Setembro de 2011. <http://www.meade.com/manuals/TelescopeManuals/lightbridge.pdf>

[28] ENZWEILER, J. *Espectrometria de Fluorescência de Raios X*. Atualizada em 23 de Novembro de 2010. Acessada em 25 de Setembro de 2011. <http://www.ige.unicamp.br/site/aulas/9/FRX-texto.pdf>

[29] GUINIER, A. *X- Ray Diffraction – In Crystals, Imperfect Crystals and Amorphous Bodies*. DOVER SCIENCE. 1ª Ed. 1994.

[30] CALLISTER, W. D. *Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada*. Rio de Janeiro 2ª ed. LTC. 2006.

[31] RUSSO, F. T.; SCALVI, R. M. F. *Investigação das Propriedade Ópticas, elétricas e estruturais em Ametista*. Bauru. 2011.

[32] ALMEIDA, R.M. *Optical and Photonics Glasses – Lecture 1: Introduction to Glass and the Glass Transition*. Acessada em 14 de Novembro de 2011. http://www.lehigh.edu/imi/OPGCourse_L.htm

[33] SANTIAGO, S. F. *Testes Ópticos. Telescópios – Site do construtor de telescópios*. Acessado em 14 de Agosto de 2011. <http://www.telescopiosastronomicos.com.br/testes.html>

Anexo 1

Bancada de Foucault

A bancada de Foucault utiliza uma pequena fonte de luz cujos raios são difratados por uma fenda. Para evitar o excesso de luz [1,2] foi utilizado como fonte de luz uma pequena lâmpada de *led*, com regulagem de intensidade luminosa, dentro de uma pequena caixa provida com um orifício. Entre o *led* e o orifício foi colocado um vidro opaco, e na frente do orifício foram colocadas duas lâminas, uma ao lado da outra permitindo, assim, que apenas uma pequena quantidade de luz chegue à superfície do espelho, a figura A1 mostra a bancada de Foucault.

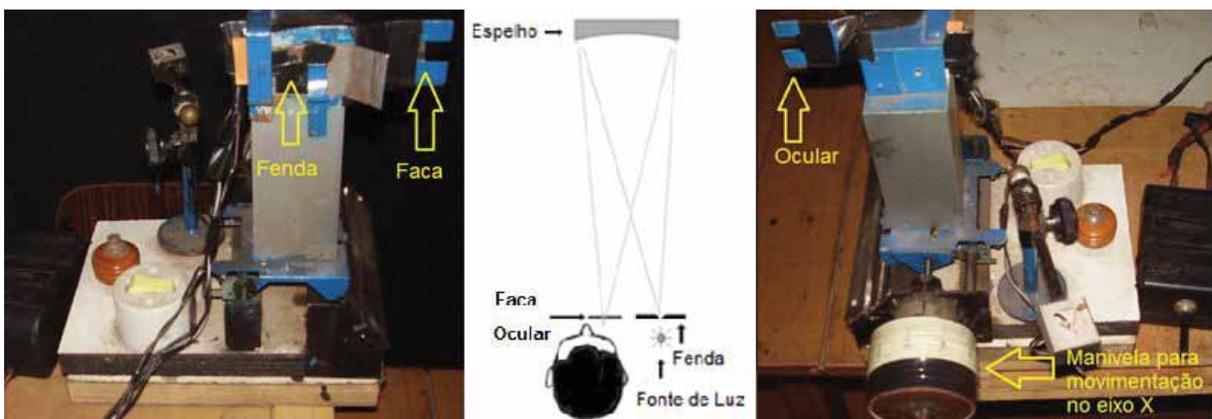


Figura A1 – A esquerda a sendo vista de frente, no centro esquema óptico da bancada de Foucault e a direita bancada de Foucault sendo vista por trás.

A figura A1 à esquerda mostra a bancada de Foucault de frente, com a fenda em que a luz sofre a difração e a faca que corta a luz refletida pelo espelho antes de ser observada na ocular. A figura A1 da direita mostra a bancada de Foucault na posição do observador, sendo a ocular onde as imagens captadas para a análise e a manivela para movimentação da bancada de Foucault no eixo X. Uma volta completa da manivela é equivalente a movimentação de 1 mm da bancada avançando ou recuando no eixo.

O espelho fica posicionado no dobro da sua distância focal da bancada de Foucault, portanto, a distância do seu centro de curvatura. A luz é refletida pelo espelho e chega até os olhos do observador [1,2], como mostra a figura A2.

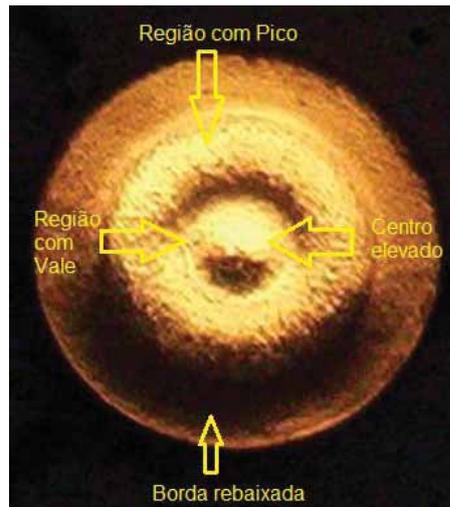


Figura A2 – Imagem do espelho na etapa de polimento, gerada na bancada de Foucault.

Com a imagem captada no teste de Foucault, conseguimos analisar o polimento e erros na curvatura do espelho. Através da figura A2 é possível ver a falta de polimento no espelho, devido a rugosidade na superfície, é possível verificar também defeitos de picos e vales através dos anéis concêntricos evidenciados na foto.

A medida que movimentamos a bancada de Foucault no eixo X, a intensidade luminosa de cada região varia. Esse fenômeno acontece devido as diferentes distâncias focais de cada região, provocada por defeitos na superfície ou devido a curvatura do espelho, como visto no capítulo 2.8. A figura A3 exemplifica a maior intensidade luminosa devido a defeitos na superfície.

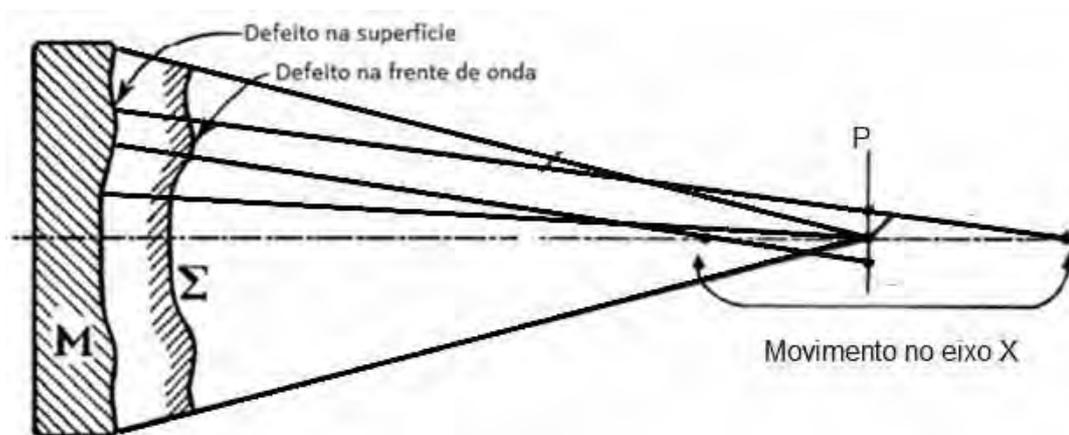


Figura A3 – Maior luminosidade das bordas devido a defeitos da superfície do espelho [1].

Através da figura A3, conseguimos ver que quando a bancada de Foucault estiver na posição P, a região que estará com maior intensidade luminosa é a borda do espelho, pois, a bancada se encontra no ponto focal dessa região do espelho, a medida que avançamos ou recuamos no eixo X outras regiões são evidenciadas.

Quando um espelho esférico é testado na bancada de Foucault, se não possuir defeitos, ele irá refletir a luz a um ponto luminoso I, se posicionarmos a faca a frente do ponto I, e movimentarmos a bancada no eixo Y, veremos uma sombra avançando no espelho pela borda direita, como mostrado na figura A4-a. Se posicionarmos a faca depois do ponto I, e movimentarmos novamente a bancada novamente no eixo Y, veremos a sombra avançando no espelho pela esquerda como mostrado na figura A4-b. Quando posicionarmos a faca exatamente no ponto I, e movimentarmos a bancada no eixo Y, o espelho começará a escurecer uniformemente como indicado na figura A4-c. Entretanto, se o espelho não é perfeitamente esférico e apresentar algum defeito de pico ou vale, conseguimos enxergá-los, como indicado na figura A4-d, onde no centro do espelho possui um pico e suas bordas estão rebaixadas.

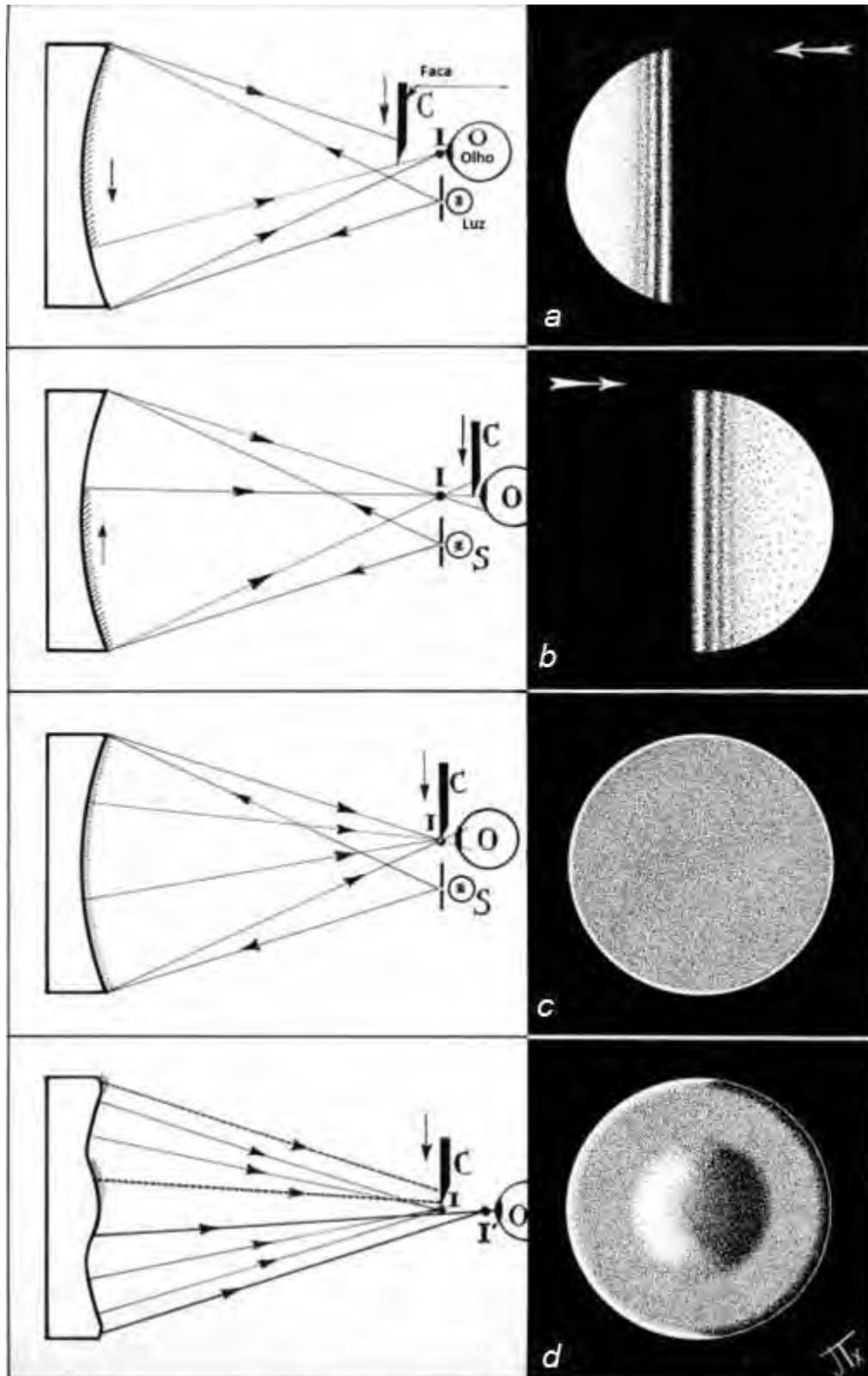


Figura A4 – Imagens da Bancada de Foucault para espelhos esféricos [1].

Quando um espelho com a curvatura parabólica é analisado na bancada de Foucault ele não apresenta um ponto, e sim uma região focal, delimitada pelo foco paraxial e marginal como visto anteriormente no capítulo 2.8. Dependendo a região em que a faca se encontra, o espelho apresentará uma intensidade luminosa diferente.

Na figura A5, a esquerda são as 3 regiões onde a faca intercepta no eixo X, a direita sua respectiva imagem no teste de Foucault. Quando avançamos a faca no foco paraxial figura A5-A, a sombra avança pela direita do espelho, entretanto, não segue de maneira uniforme como acontece no espelho esférico, suas bordas são sombreadas antes que seu centro. Interceptando no foco mediano, são formadas duas regiões distintas nos espelho, a 70% do raio do espelho para as bordas as sombras avançam da direita para esquerda, enquanto que 70% do raio para o centro do espelho a sombra avança da esquerda para a direita, como pode ser visto na figura A5-B. A faca na região de foco marginal, a sombra avançará da borda esquerda para a direita como pode ser observado na figura A5-C, com sua borda escurecendo antes que o centro do espelho.

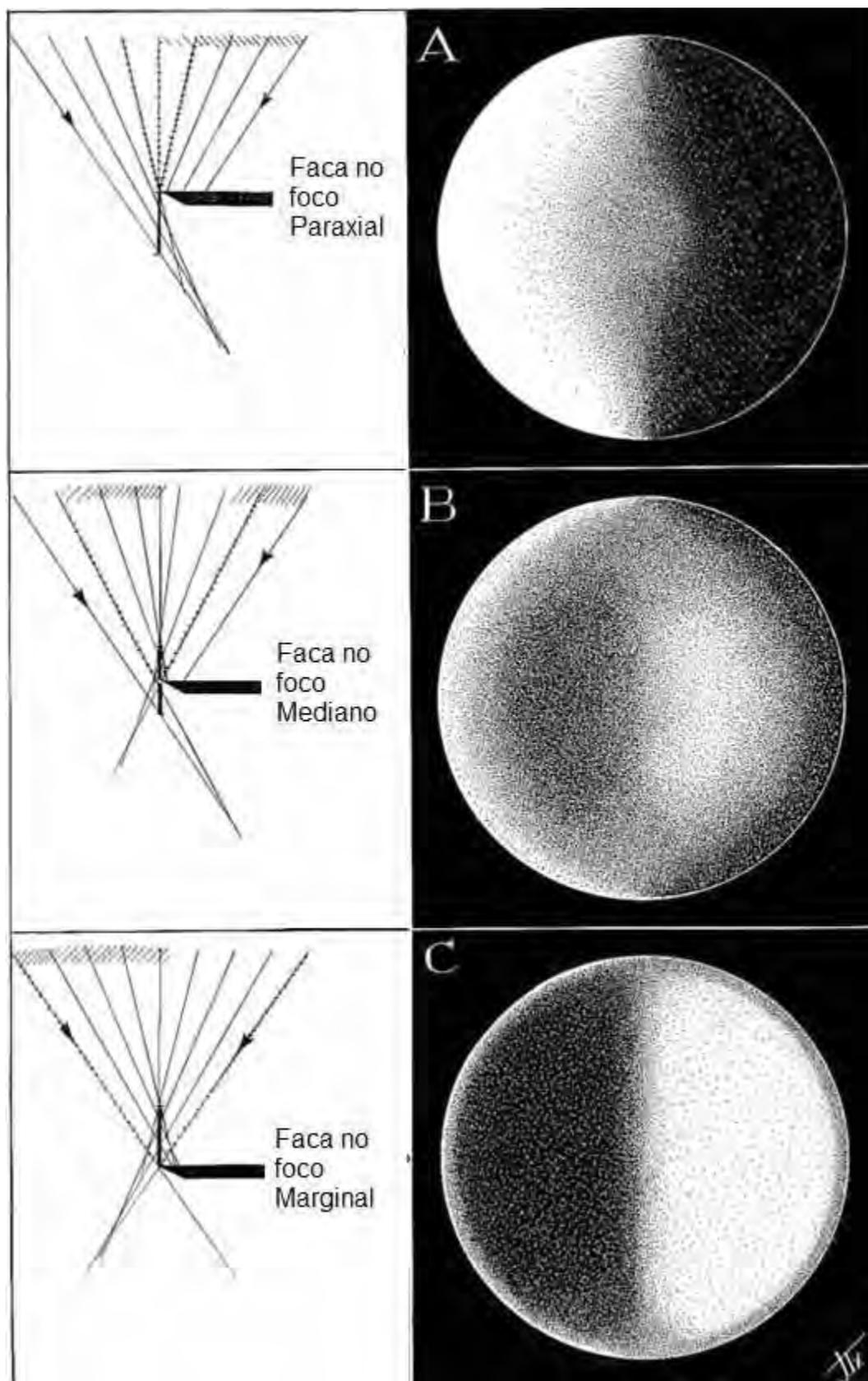


Figura A5– Espelho com curvatura parabólica e sem defeitos analisado no Foucault [1].

Utilizar apenas a bancada de Foucault para a correção da superfície é muito difícil, principalmente quando existe mais de um erro na superfície do espelho, para facilitar a análise de erros a bancada de Foucault é associada a outros teste como a máscara de A. Couder e a grade de difração de Ronchi.

- A. Couder

Para a fabricação de espelhos parabólicos a máscara de A. Couder nos auxilia fazer uma medida mais precisa de cada região do espelho, a máscara é feita de cartolina, com o mesmo diâmetro do espelho utilizado, o número de zonas e seus tamanhos são determinados seguindo algumas regras. O número de zonas [2] é fornecido pela relação:

$$Z = \left[\frac{D^2}{F} \right]^{0.4}$$

Onde Z é numero de zonas, D é o diâmetro do espelho em mm e F a distância focal do espelho em mm. As espessuras das regiões concêntricas são determinadas seguindo a relação:

$$h_2^2 = h_1^2 + K; h_3^2 = h_1^2 + 2K; h_4^2 = h_1^2 + 3K$$

sendo h a abertura de cada zona e K uma constante. A primeira zona deve ser calculada com um F/D entre 15 a 20 aproximadamente [2] e a última zona deve ser calculada com no mínimo 5mm de largura para cada metro de distância focal do espelho [1] a figura A6 mostra a máscara de A. Couder com 5 zonas

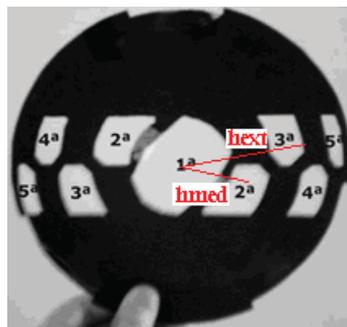


Figura A6 – Máscara de A. Couder com 5 zonas.

Determinando o diâmetro do espelho a ser construído e sua distância focal, é possível calcular a distância focal de cada zona na região entre o foco paraxial e marginal do espelho através da relação:

$$\Delta p_t = \frac{(h_{ext})^2}{2R}$$

Onde Δp_t é a distância focal teórica de cada zona entre a região de foco paraxial e marginal, h_{ext} é a medida externa de cada zona e R é o raio do centro de curvatura [1, 2].

- **Grade de difração de Ronchi**

Esse teste é utilizado apenas de maneira qualitativa, como intenção de confirmar o que está sendo aferido na máscara de A. Couder, esse teste é muito eficiente para analisar o espelho inteiro, enquanto a máscara de A. Couder analisa apenas uma faixa do espelho por vez. O teste de Ronchi é feito na bancada de Foucault na posição intra-focal, com grade de difração na ocular da bancada, essa grade de difração deve conter 5 linhas retas por milímetro.

A figura A7 mostra a esquerda as imagens da grade de difração na bancada de Foucault e a direita o espelho com seu respectivo erro.

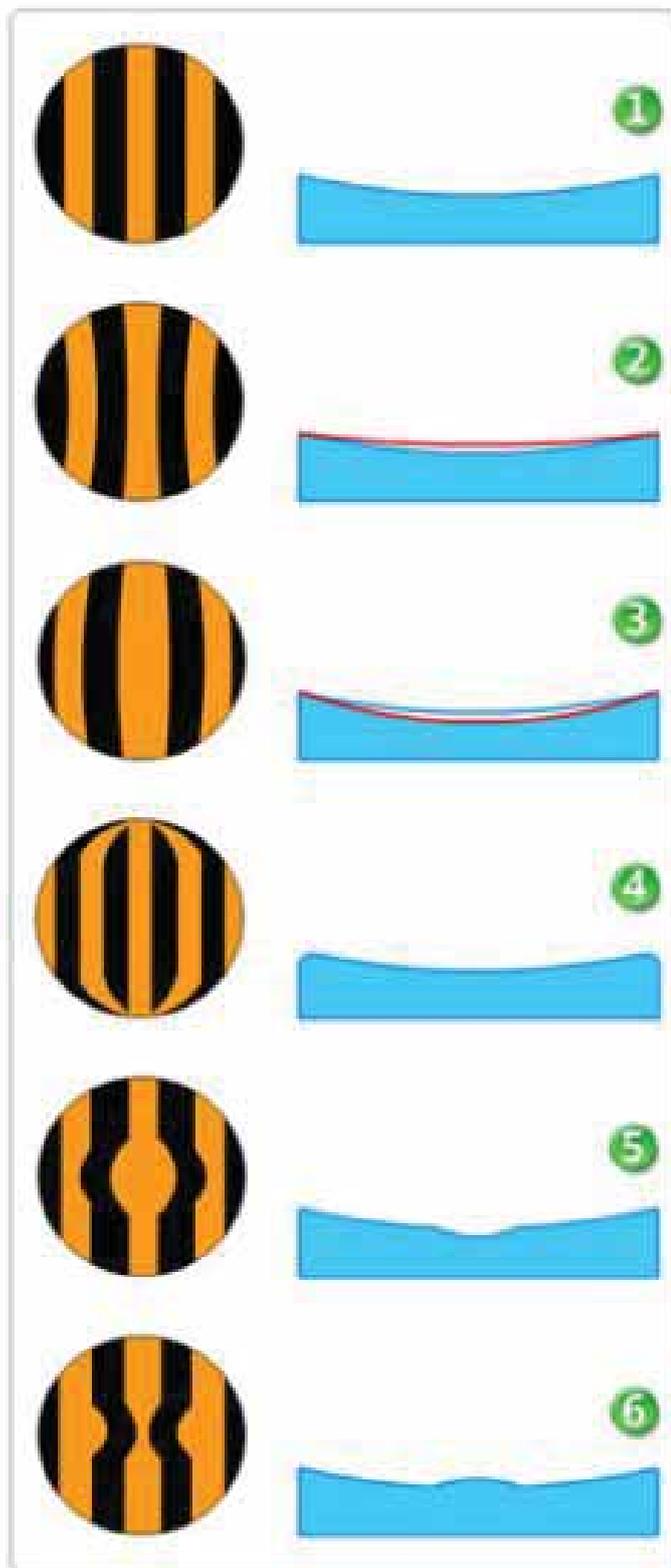


Figura A7 – Imagem captada na ocular com a grade de difração de Ronchi e seu respectivos erros [3].

Na figura A7-1 temos um espelho perfeitamente esférico, devido a isso suas linhas se apresentam de forma reta, com a mesma espessura e paralelas.

Na figura A7-2 o espelho possui a curvatura parabólica, o centro do espelho possui o raio de curvatura menor que o da borda, assim, a distância focal do centro é menor que a da borda. O desenho da direita mostra a curvatura esférica em azul, enquanto a linha vermelha indica a curvatura parabólica. Pode-se observar que as linhas da grade se reclinam para o centro do espelho. Essa curvatura é característica nos telescópios parabólicos.

Na figura A7-3 o centro do espelho possui o raio de curvatura maior que o da borda, portanto a distância focal do centro maior que a das bordas, essa configuração aumenta a aberração esférica do telescópio, à esquerda vemos as linhas se afastando do centro, e a direita vemos a curvatura esférica em azul e a linha vermelha indica a curvatura apresentada.

Na figura A7-4 temos o espelho esférico e com um defeito de zona, no caso borda rebaixada. Para facilitar o trabalho, se essa região de borda caída não for grande, aproximadamente 5 mm, podemos utilizar um anel que ignore essa região, evitando assim o trabalho de correção.

Na figura A7-5 o espelho também apresenta defeito de zona, só que agora no centro do espelho. O centro apresenta um vale, um defeito que é difícil de ser corrigido. Se o vale for menor que o tamanho da sombra do espelho secundário, não precisa corrigir o espelho pois as imagens não serão prejudicadas, entretanto, se o vale for maior que a sombra causada pelo espelho secundário, é necessário rebaixar toda a superfície do espelho até o nível do vale.

Na figura A7-6 o espelho também apresenta um defeito de zona no centro, um pico. Se o defeito for menor que o tamanho da sombra criada pelo espelho secundário, ignoramos da mesma forma que fizemos com o último defeito, mas se o erro for muito grande trabalhamos com uma torta do tamanho do defeito e apenas na região central, tomando muito cuidado para esse pico não se transformar em um vale.

Entretanto, apesar de ser apresentado de maneira bem simples, é muito difícil a interpretação da grade de Ronchi, principalmente quando existem mais de dois erros associados, um exemplo mais comum de ser encontrado é mostrado na figura A8:

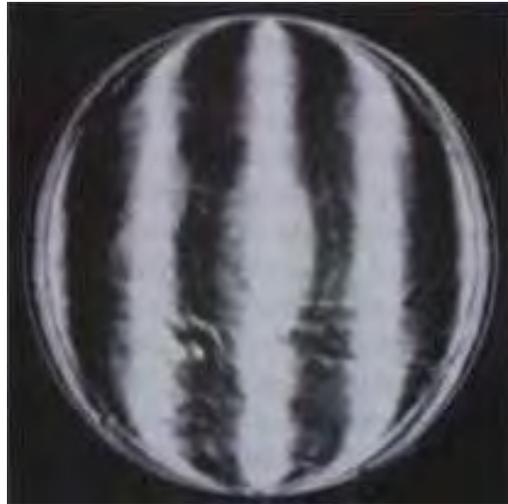


Figura A8– Espelho analisado com a grade de difração de Ronchi com diversas deformações [1].

Podemos ver os diversos erros no espelho do telescópio através das distorções nas linhas, como borda caída, vale no centro e rugosidade da superfície.

- **Referências Bibliográficas do Anexo 1**

[1] TEXERAU, J. How to Make a Telescope. 2ª Ed. Richmond. Willman-Bell. 1984.

[2] SCHERMAN, J; VIOLA, A.H., Construccion de Telescopios: Manual del Aficionado. Buenos Aires. Asociacion Argentina de Astronomia. 1960.

[3] SANTIAGO, S. F. Testes Ópticos. Telescópios – Site do construtor de telescópios. Acessado em 14 de Agosto de 2011. <http://www.telescopiosastronomicos.com.br/testes.html>