

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Física

CONSTRUÇÃO DE INSTRUMENTOS TÉCNICOS DE ASTRONOMIA PARA A  
DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA  
Telescópio fotométrico de grande abertura e baixo custo

João Eduardo de Souza da Fonseca

Prof(a).Dr(a). Dario Antonio Donatti

Rio Claro (SP)

2015

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Câmpus de Rio Claro

JOÃO EDUARDO DE SOUZA DA FONSECA

CONSTRUÇÃO DE INSTRUMENTOS TÉCNICOS DE  
ASTRONOMIA PARA A DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA  
Telescópio Fotométrico de grande abertura e baixo custo

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas -  
Câmpus de Rio Claro, da Universidade  
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para  
obtenção do grau de Licenciado em Física.

Rio Claro - SP  
2015

JOÃO EDUARDO DE SOUZA DA FONSECA

**CONSTRUÇÃO DE INSTRUMENTOS TÉCNICOS DE  
ASTRONOMIA PARA A DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA**  
Telescópio Fotométrico de grande abertura e baixo custo

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas -  
Câmpus de Rio Claro, da Universidade  
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para  
obtenção do grau de Licenciado em Física.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Dario Antonio Donatti, UNESP – Rio Claro

Prof. Dr. Giovani Gozzi, UNESP – Rio Claro

Prof. Dr. Luiz Antonio Barreiro, UNESP – Rio Claro

Rio Claro, 30 de janeiro de 2015.

João Eduardo de Souza da Fonseca

Prof. Dr. Dario Antonio Donatti

*Dedicado ao  
Grupo de Astronomia Amadora  
M-104 – Los Sombreros  
“os Alcoólatras Astrônomos”*

## **Agradecimentos**

*Agradeço primeiramente ao grupo de astronomia amadora, o qual tenho imenso prazer de participar desde sempre, o M-104 – Los Sombreros, os Alcoólatras Astrônomos, ao meu pai, que me permitiu essa longa jornada de 8 anos de diversão e conhecimento, ao grande amigo e Márcio Reiss, que sempre deu aquela força, ao pessoal da República Toka do Shrek, por me aguentarem firme e forte, pois sei que não foi fácil, ao Prof. Dr. Dario, por me conceder essa oportunidade de criar o TCC com toda a liberdade de pensamento, ao SENAI e ao Departamento de Física, pelo acolhimento e confiança.*

## **Resumo**

Apesar da popularização da Astronomia que veio ocorrendo nessa última década culminando no Ano Internacional da Astronomia, comemorado em 2009, ainda sentimos uma grande carência no que diz respeito a instrumentos de qualidade para a divulgação astronômica. Pensando nisso, pretendemos resgatar e elucidar melhor uma técnica há muito esquecida, que é a confecção de espelhos para telescópios em substrato metálico, como era feito nos primeiros telescópios refletoras. No entanto, com os recursos disponíveis hoje em dia e dada a alta pureza dos materiais, nossos resultados pertencem a um nível de excelência muito além dos pioneiros da técnica. Desenvolvemos e construímos um telescópio de grande abertura (250 mm de diâmetro) e grande luminosidade (relação focal = 4,0), bastante versátil e portátil. Neste trabalho descrevemos, passo a passo, a confecção e a montagem do telescópio. Através das primeiras imagens feitas da Lua, conseguimos exemplificar sua versatilidade tanto para uso em eventos de divulgação como para uso na astronomia amadora, por se tratar de um instrumento de foco primário e equipado com acessórios que permitem a captação de imagens digitais de qualidade, podendo executar o registro de eventos astronômicos diversos.

**Palavras chave:** Construção Amadora de Telescópios. Espelhos Metálicos.  
Divulgação Astronômica.

## **Abstract**

Although the popularization of astronomy in the last decade and the International Year of Astronomy, celebrated in 2009, there's a great lack in respect of quality instruments for astronomical disclosure. Thinking in this research about it, we intend to recuperate and elucidate a technique long forgotten: the metal mirror amateur telescope, once was done in the first reflecting telescopes. However, with the resources available today and given the high purity of the materials, our results were better than that obtained by the pioneers. We developed and built a large aperture telescope (250 mm diameter) and very bright (focal ratio = 4.0), versatile and portable. In our study was described step by step the process to fabricate the telescope. Through its first images captured of the Moon, we can illustrate its versatility both for use in outreach events and for use in amateur astronomy, because it is a primary focus capture system and can run registration of various astronomical events.

**Key words:** Amateur Telescope Maker. Metal Mirror. Astronomical Disclosure.

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. MATERIAIS E MÉTODOS .....	12
3. A CONSTRUÇÃO .....	15
3.1. Célula do primário .....	15
3.2. Anel de captação de imagens .....	17
3.3. Estrutura <i>String / truss</i> .....	17
3.4. O conjunto como um todo .....	18
4. O ESPELHO .....	19
4.1. O Bloco.....	19
4.2. Gerando a calota esférica.....	19
4.3. Criando ferramentas de polimento.....	20
4.4. Polindo o espelho.....	21
5. O INSTRUMENTO.....	22
5.1. Colimando.....	22
5.2. O equipamento periférico.....	23
5.3. A primeira luz.....	23
6. CONCLUSÃO.....	24
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA .....	26
GLOSSÁRIO .....	27
APÊNDICES .....	32
APÊNDICE A – Croqui inicial para geração da calota esférica.....	32
APÊNDICE B – Confecção manual de espelhos de Alumínio.....	33



APÊNDICE C – Tabela de Valores .....	37
APÊNDICE D – O Esferômetro ..	38
APÊNDICE E – Testes com ligas de Alumínio .....	43
ANEXOS .....	45
ANEXO A – O Espelho Paraboloide.....	45

# 1. INTRODUÇÃO

Em 1609, desde que Galileu Galilei apontou pela primeira vez sua luneta para o céu e abriu as portas da percepção para o mundo do muito grande, houve uma ruptura no conhecimento da época e um questionamento eminente da nossa posição no mundo.

A partir de então muito se desenvolveu no que diz respeito a instrumentos ópticos para astronomia. A prova dessa evolução são os grandes telescópios do Chile e Havaí e o telescópio espacial Hubble, que foi outro marco importante para essa e outras ciências.

No Brasil, embora ainda pouco difundida, houve um crescimento significativo da Astronomia na última década. Surgiram muitos encontros regionais e pequenos congressos voltados aos amadores e entusiastas, que veio aos poucos espalhando a cultura do Construtor Amador de Telescópios (ATM na sigla em inglês). Isso possibilitou a construção de bons telescópios e ótimas adaptações em instrumentos comerciais, já que estes são sempre importados e de difícil acesso devido ao custo elevado.

Em 2011, em Rio Claro, começaram algumas pesquisas sobre como eram feitos os espelhos de telescópios refletores, como é o caso do telescópio de Isaac Newton, para saber mais sobre do que e como eram feitos no início.

O primeiro telescópio reflector só foi construído efetivamente em 1668. Seu inventor foi o físico inglês Isaac Newton (1642 – 1727). O sistema óptico de um telescópio de Newton é constituído por três elementos: um espelho côncavo (espelho primário); um espelho plano (espelho secundário) e uma lente convergente (ocular). Ou seja, foi o primeiro telescópio a não utilizar lentes e sim espelhos como mostra a Figura 1:



Figura 1: esquema óptico de um telescópio refletor newtoniano

O substrato para esses espelhos do sistema óptico deste telescópio não é o vidro, como conhecemos hoje em dia. Ele é formado de uma liga metálica impura de cobre e estanho conhecida como *speculum*, que quando polida, sua superfície tinha boa reflexão da luz incidente.

Foram testadas várias ligas metálicas como o INOX, Latão, Bronze e Alumínio. Os resultados foram satisfatórios em todas, porém uma chamou bastante a atenção por ser leve, macia porém estruturalmente rígida e apresentar ótima refletividade e ser barata: o Alumínio.

Iniciou-se então uma série de testes em Alumínio com várias ligas diferentes e várias formas de polimento sempre visando materiais de fácil acesso e baixo custo como lixas comerciais, nanquin, e alguns tecidos como o tafetá e cetim. Houve uma surpresa pela facilidade de polimento e rapidez no processo.

Foi então que surgiu a ideia de criar instrumentos maiores (dificuldade grande com o vidro) e que possam ser usados tanto para divulgação científica como para a astronomia amadora, onde será ilustrado de forma clara nesse trabalho, todo o seu desenvolvimento e construção.

Na Tabela 1 abaixo será definido alguns termos importantes para a leitura deste trabalho:

**Tabela de termos e definições importantes**

<b>Termo</b>	<b>Abreviatura</b>	<b>Definição</b>
Abertura	D	Diâmetro do espelho primário
Aumento	Nx (N=número)	Quantidade de vezes que o objeto está aumentado. Obtem-se esse valor dividindo a distância focal pela distância focal da ocular.
Célula do primário	Célula	Dispositivo para suporte, fixação e alinhamento do espelho primário com os demais componentes ópticos.
Colimação	Não se aplica	Alinhamento dos componentes ópticos do telescópio em relação ao eixo óptico.
Distância focal	f	Distância entre o ponto focal e a superfície do espelho.
Eixo óptico	a	Eixo de simetria que liga o centro do espelho ao ponto focal.
Espelho primário ou principal	Primário	Espelho côncavo com superfície polida opticamente onde os raios de luz incidentes convergem em um ponto focal.
Espelho secundário ou diagonal	Não se aplica	Espelho elíptico (newtoniano) inserido a 45° em local específico do cone de luz

		para desviar o eixo óptico para a lateral do telescópio.
Foco	Não se aplica	Ponto onde convergem os raios de luz incidentes no espelho.
Foco primário	Não se aplica	Foco direto do telescópio, sem passar por nenhum outro artifício óptico
GoTo (sistema de guiagem)	Não se aplica	Sistema computadorizado baseado em sinal de GPS para apontamento e guagem automática de telescópios.
Ocular	Não se aplica	Conjuntos de lentes convergentes que possibilitam a formação da imagem. Possuem distância focal definida.
Off set	Não se aplica	Deslocamento lateral aplicado ao espelho secundário em relação ao eixo óptico para que o cone de luz do espelho primário cubra todo o espelho secundário.
Relação focal	$f/D$ ou $F$	Relação de luminosidade de um telescópio, obtida dividindo a distância focal ( $f$ ) pelo diâmetro do espelho ou abertura ( $D$ ): quanto menor a relação focal, mais luminoso e quanto maior a relação focal, mais aumentos.
Telescópio fotométrico	Não se aplica	Telescópio voltado ao estudo direto da radiação visível incidente no espelho. Quanto menos componentes ópticos a luz passar, melhor é a fotometria.
Vinhetagem	Não se aplica	escurecimento das bordas do campo devido à obstrução dos raios periféricos do cone de luz

Tabela 1: definições dos principais termos utilizados no texto

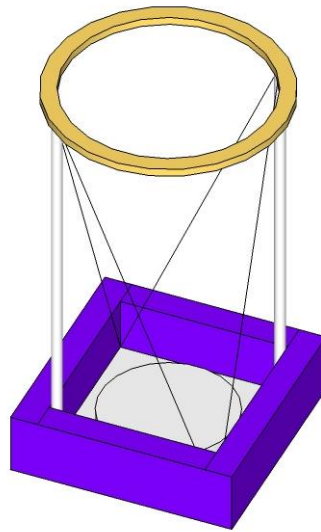
## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Primeiramente, a configuração inicial era construir um telescópio fotométrico de grande abertura e baixo custo que fosse portátil e de fácil manuseio. Sua configuração inicial era um telescópio de 430 mm de abertura e  $f/D = 2,8$ . Porém devido as dificuldades iniciais encontradas – porte de usinagem do maquinário de Central Numérica Computadorizada (CNC) da região limitado em 280 mm, o projeto foi alterado para um  $D = 250$  mm  $f/D = 4,0$ .

Pensando em termos de leveza e praticidade, o modelo escolhido foi baseado em um *truss tube* do tipo *string* que foi desenvolvido e projeto de Dan Gray, o qual foi bastante estudado e descrito por Don Peckham, Astrônomos amadores

estadunidenses (<http://dbpeckham.com/Telescope/String/StringScope.htm>). Um esquema desse tipo de telescópio é apresentado na Figura 2.

Outra facilidade usada é o foco primário. Como a ideia é um telescópio fotométrico, a aquisição de imagens será dada através de um CCD comercial (pode ser uma webcam HD) em foco primário, que dispensa o uso de espelho plano secundário no conjunto, assim como a aquisição de diversas oculares, cortando ainda mais custos do projeto.



*Figura 2: modelo string de dois apoios ajuda na leveza e na simplicidade de construção, facilitando a montagem e colimação.*

Porém, a grande inovação desse conjunto, é seu espelho primário, único espelho no caso, já que neste projeto não há espelho secundário. Ao invés de seguir a linha tradicional na construção de telescópios nos dias de hoje, onde o principal substrato para os espelhos é o vidro (normalmente soda-lime, baquelite BAK4 / BAK7, Pyrex, CCZ, Zerodur, ou mesmo quartzo), este será construído em Alumínio.

Após intensas pesquisas em corpos de prova de Alumínio, que estão descritas no XXXXXXXX, a escolha final foi o Alumínio na liga #6351 na têmpera T6, onde sua estrutura cristalina permitiu uma melhor figuração em termos ópticos.

Então através de uma parceria com o SENAI de Rio Claro, o desbaste inicial da colota esférica foi feita num Torno de Controle Numérico Computadorizado (CNC).

Após finalizada toda a montagem estrutural do Telescópio, ele será acoplado numa Montagem Equatorial EQ8 (Figura 3), pertencente ao Telescópio ZEISS Meniscas 1800 do Departamento de Física da UNESP de Rio Claro para fins

demonstrativos, pois sua melhor performance seria em montagens computadorizadas equipadas com sistema de guiagem e apontamento, os chamados *GoTo's* munidas de um computador para a aquisição das imagens.



Figura 3: Montagem equatorial Germânica EQ8 do telescópio ZEISS Meniscas 1800

Na Tabela 2 abaixo podemos conferir um custo médio do telescópio:

	Descrição	Quantidade	Valor (R\$)
1	Bloco de Alumínio #6531 T6	1	80,00
2	Madeiras para a Célula do primário	1 m <sup>2</sup>	17,00
3	Cabo de vassoura	2	6,00
4	Cabo de aço encapado	6 m	4,00
5	Roda Aro 16	1	17,00
6	Carcaça de Cubo rolamentado	1	7,00
7	Tecido tafetá	0,5 m	9,00
8	Massa plástica	5	35,00
9	Manoplas	3	5,00
10	Cola PVA/Álcool	3	9,00
11	Parafusos	-	5,00
12	Total	-	194,00

Tabela 2: Custos matérias do projeto

Observação: não está incluso nesta tabela o custo da hora de um torno CNC, já que o serviço foi uma parceria entre UNESP e SENAI

No capítulo seguinte será melhor detalhado o passo a passo da construção do telescópio, contemplando peças e adaptações que foram utilizadas e eventuais modificações pertinentes a este projeto.

### **3. CONSTRUÇÃO**

Envolve toda a estrutura do telescópio, exceto seus componentes ópticos e está dividida em 3 partes: a célula do primário que é a estrutura que recebe e acomoda o espelho primário, o anel de captação de imagens, que seria a estrutura situada no eixo óptico, exatamente na distância focal do espelho primário onde é inserida a CCD e a estrutura *string/truss*, que une as outras duas partes.

#### **3.1. Célula do espelho primário**

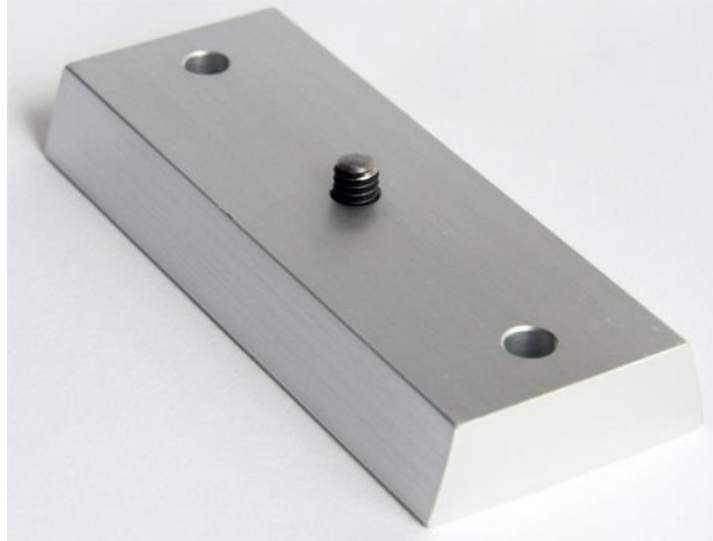
A célula do Espelho primário foi confeccionada em MDF naval de 30 mm de espessura, afim de eliminar qualquer torção ou empenamento proveniente da tensão dos fios (*string*) ou mesmo dos apoios (*truss*) (vide Figura 2).

Possui na parte inferior, três parafusos com para efetuar a colimação do sistema óptico, ou seja, alinhar o espelho primário com o anel de captação de imagens em cima do eixo óptico (eixo imaginário perpendicular ao centro do espelho até o ponto focal) a fim de aumentar o ganho de luz. Estas estão atarrachadas diretamente na madeira e sem célula de flutuação, pois o espelho composto de liga metálica, o que garante maior rigidez mecânica ao bloco, diferente do vidro.

O caixote foi invertido para proteger os parafusos de colimação, evitando um desalinhamento desnecessário do sistema como um todo depois de montado.

Para fixar o espelho na célula, foram usados pequenos ganchos em L emborrachados, o que facilita a retirada para eventuais limpezas, já que o conjunto será bastante exposto ao tempo durante as observações.

Um dos lados do caixote possui um reforço para receber o encaixe tipo *dovetail* (Figura 4) do telescópio Zeiss, do Departamento de Física para ser acoplado à montagem para demonstração (EQ8).



*Figura 4: dovetail:s encaixe tipo “rabo de andorinha”*

Seguem algumas fotos da Célula do primário na figura 5:



*Figura 5: Acélula vista de cima com as pinças (esquerda) e de baixo, mostrando os parafusos de colimação com as manoplas (direita)*



### 3.2. Anel de captação de imagem

Consiste em uma roda de bicicleta aro 16 adaptada. Dos 16 raios que a roda possui, fazemos com apenas 4, em formato de cruz, onde esses 4 raios tensionam por igual o cubo (parte central da roda).

Constatou-se que o cubo original dessa roda não possuía eixo de simetria, portanto adquiriu-se uma outra carcaça de cubo, desta vez, rolamentada (apenas a carcaça, sem os rolamentos), que vem melhor alinhada possibilitando um melhor encaixe dos rolamentos, o que fornece uma melhor usinagem para adaptação dos periféricos de captação de imagem.

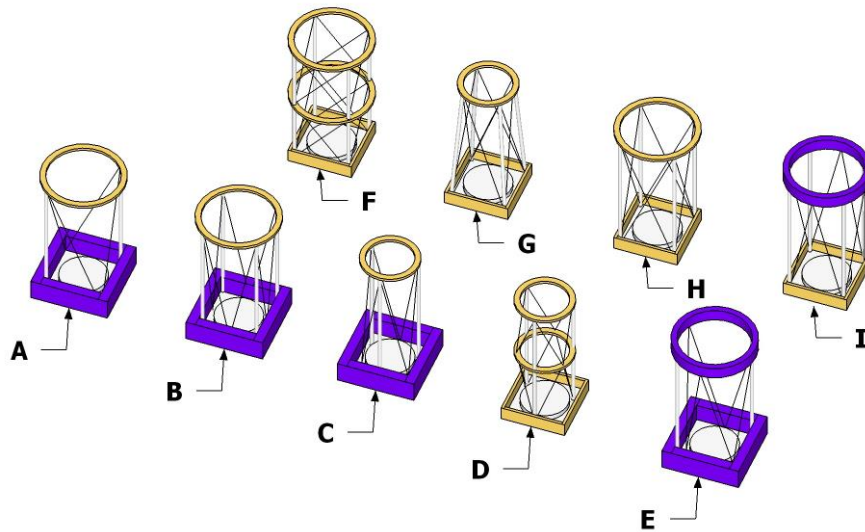
A centralização do cubo, assim como a colimação foi feita através do ajuste dos raios, de forma a variar a tensão em cada quadrante do anel.



Figura 6: o anel - suporte para o equipamento de captação de imagens feito de uma roda de bicicleta aro 16 e um cubo rolamentado.

### 3.3. Estrutura *string* / *truss*

A estrutura que liga a célula do espelho primário ao anel de captação de imagens foi desenvolvida no início de 2014 pelo astrônomo amador estadunidense Dan Gray (<http://bbastrodesigns.com/osp14/osp14.html#R. Miles>) e melhor estudado e descrito por Don Peckham (<http://dbpeckham.com/Telescope/String/String8.htm>), conterrâneo de Gray. Peckham fez um estudo detalhado de possibilidades para *string telescopes* como podemos ver na Figura 7:



*Figura 7: Modelos estudados por Peckham para telescópios tipo string. Este trabalho se baseia na modelo A.*

O objetivo principal é a leveza e rigidez, porém para este trabalho visa também a portabilidade por uma livre adaptação do conceito, já que o objetivo é acompanhar eventos astronômicos em qualquer lugar.

Para os modelos de Peckham, os cabos possuem elasticidade e as barras rígidas são tubos vazados. Já em neste trabalho, foi usado cabos de madeira (como os de vassoura) e cabos inextensíveis de aço encapado com 2 milímetros de espessura, que torna a estrutura mais delicada e rígida.

Com o foco é primário, otimiza-se o sistema de focagem, tornando-o mais preciso. Entretanto, por não haver um tubo, envolvendo o sistema, cria uma vinhetagem de luz fantasma ou intrusa, aquela que entra lateralmente pelo sistema óptico que gera muito ruído também dificultando um pouco o foco.

### **3.4. O Conjunto como um todo**

Depois de montado, o conjunto mostrou-se bem eficiente em seu propósito. Com estrutura firme, pesando cerca de 11 quilogramas, ele atendeu muito bem os requisitos iniciais, que é leveza, rigidez e portabilidade.

Ainda há pontos a serem alterados em sua estética para um visual mais adequado, mas nada que comprometa seu funcionamento. A Figura 8 o aspecto final após a montagem da estrutura:



*Figura 8: Conjunto montado, mostrando da esquerda para a direita o anel de captação de imagens, a estruturas string / truss e a célula do primário.*

## **4. O ESPELHO**

Como principal componente deste trabalho, este espelho metálico exige um pouco mais de detalhes em sua confecção.

### **4.1. O Bloco**

O bloco foi adquirido já redondo, na liga #6351 T6 da Alcoa. Já havia feito alguns testes com essa liga nessa temperatura e o material se mostrou bastante satisfatório como foi citado anteriormente (ver .

Ainda fizemos testes com latão, bronze e INOX com ótimos resultados, especialmente o latão para comprimentos de onda mais longos como o infravermelho próximo, ajudando bastante no contraste de cor de estrelas. Embora significativos, esses resultados não serão tratados aqui, ficando apenas como sugestão de possível continuidade deste trabalho.

### **4.2. Gerando a calota esférica**

O disco de alumínio foi levado ao SENAI de Rio Claro para que fosse gerada uma calota esférica com raio igual a dois metros. Foi criado um programa para que um torno CNC gerasse tal curvatura no bloco. Para isso, um croqui (apêndice A) foi

feito, de forma a ajudar na confecção desse programa, explicitando os principais componentes da geometria óptica necessária.

Em menos de duas semanas, foi entregue de volta o bloco já usinado, faceado e com a curva gerada, como mostra a Figura 9 a seguir:



*Figura 9: espelho com esfêmetro (instrumento de medida de esfericidade) mostrando a curva gerada.*

### **4.3. Criando ferramentas de polimento**

Duas ferramentas de polimento são necessárias para essa empreitada: uma para tirar as marcas de usinagem deixadas pelo torno e outra para efetivar o polimento a nível de figuração óptica.

A primeira, é uma ferramenta de massa plástica com aproximadamente o diâmetro do espelho. Esta terá uma cobertura de uma lixa caseira feita com tecido Tafetá e uma pasta à base de cola adesiva de PVA/Álcool misturada com Carbureto de Silício (SiC) granulometria #1000. Esta lixa foi presa à ferramenta de massa plástica através de uma abraçadeira simples ao redor desta, feita com uma bitola de cobre.

Já a segunda ferramenta, tem como objetivo tornar o espelho parabólico, de modo eliminar a aberração esférica, possibilitando assim uma foco mais preciso. Esta segunda possui um diâmetro aproximado de 150 milímetros, que equivale a 60% do diâmetro do disco de alumínio.

#### 4.4. Polindo o espelho

Nesta etapa, é preparada uma bacia com uma solução de água e detergente para facilitar os movimentos, onde o espelho fica praticamente submerso nesta, com apenas uma fina lâmina de água na superfície.

O polimento se inicia com a ferramenta maior, com abrasivo #1000. Os movimentos são basicamente um zigzag com deslocamento lateral do centro da ferramenta de no máximo 67% do diâmetro e amplitude de algumas dezenas de milímetros. Esse procedimento leva cerca de 5 horas. A superfície é analisada com uma lupa de aumento a cada 30 minutos de trabalho, para verificar se a diminuição das marcas de usinagem (que são praticamente círculos concêntricos) e se estes estão desaparecendo de maneira uniforme e como o esperado. Praticamente 7 horas nesta etapa e o espelho já apresentou uma superfície bem suave e lisa.

Com a primeira etapa terminada, inicia-se o polimento final (ver anexo B), onde a superfície torna-se o mais lisa possível, com a melhor refletividade possível. Este processo é mais demorado e delicado, onde a aferição da superfície tem que ser feita por interferometria, que neste trabalho foi usado um interferômetro de foucault que foi construído para este fim como pode ser visto no apêndice D, fazendo uso de uma grade de Ronchi de 100 linhas por polegada.

Após cerca de 13 horas de polimento, chega-se na figura óptica desejada, como podemos julgar qualitativamente na Figura 10 abaixo:



*Figura 10: ronchigrama feito após a ferramenta de 250mm (esquerda) e após a ferramenta de 150mm (direita). Ambas imagens são satisfatórias, mostrando que mesmo antes do polimento estar completo, o espelho já apresenta boa refletividade.*

Com isso, em cerca de 20 horas de trabalho manual o polimento de um espelho de difícil figuração (250 mm, f/D 4) foi realizado, mostrando que é plausível a construção de espelhos metálicos para divulgação astronômica de qualidade.

## 5. O INSTRUMENTO

Feito o polimento do espelho e a montagem da estrutura, resta agora montar o conjunto de modo a alinhar seu conjunto óptico.

### 5.1. Colimando

Depois de montado na estrutura *String truss*, o espelho tem que ser colimado, ou seja, alinhar seus componentes ópticos com o eixo óptico do telescópio (ver linha “a” do Apêndice A), de forma que o disco de captação de imagens fique centrado, otimizando assim o ganho de luz incidente no aparelho coletor, no nosso caso um CCD comercial.

Para fazer esse alinhamento, utilizamos um colimador laser como o da figura a seguir:



Figura 11: Colimador Laser Antares

Com uma simples marca no centro do espelho, pode-se facilmente alinhar o feixe com o centro do espelho tensionando os raios de bicicleta do anel de captação de imagens. Em seguida, colimama-se o espelho primário através das 3 manoplas traseiras de sua célula.

Então substitui-se o colimador laser pelo sistema de captação de imagens como veremos a seguir.

## 5.2. O equipamento periférico

Para este caso específico, por falta de recursos para a aquisição de uma CCD dedicada, vamos usar provisoriamente uma câmera compacta com adaptador para iridologia, seguida de uma ocular modular de 5 milímetros de distância focal.

Nesse caso será usada uma Câmera Sony Cyber-Shot modelo DSC-W110, uma ocular modular Baader-Planetarium modelo Hyperion 5mm e um redutor focal Master-View Iridophoto.

O sistema ficou configurado como mostra a Figura 12 abaixo:



Figura 12: periféricos: a ocular de 5mm, o redutor focal e a câmera. A direita, o conjunto montado.

## 5.3. A primeira Luz

Para a primeira luz, ou seja, a primeira observação, foi escolhida uma estrela muito conhecida e estudada, chamada Sirius. É a estrela mais brilhante do céu, situada na constelação do Cão Maior (*Canis majoris*), constelação de fácil localização no céu de verão devido sua proximidade com com 3 estrelas de brilho semelhante, alinhadas e aproximadamente equidistante, conhecidas como 3 marias, pertencentes a constelação de Órion, o caçador. Sirius possui um brilho azulado e constante quando já está mais de 45° acima do horizonte. Por essas características, foi a escolhida para termos nossa primeira luz com o equipamento desenvolvido neste trabalho.

Porém, devido ao constante mal tempo e ao acesso restrito ao equipamento de captação (apenas finais de semana), não se pode fazer a fotometria de Sirius, mas registrou-se imagens da Lua em sua fase crescente nos dias 26 e 27 de janeiro deste ano. Essas imagens ainda não representam a real capacidade dos espelhos metálicos e devem ser tomadas apenas como exemplo, já que as condições

climáticas e de estabilidade não foram favoráveis. Também não foi possível estimar o poder separador, ou seja, a capacidade de distinguir dois objetos angularmente próximos.



*Figura 13: foto da Lua tirada dia 26 e 27/01/2015. Nota-se que o foco está impreciso e o tempo não estava muito estável. À esquerda, com uma ocular de 30mm (33x) e à direita com uma de 5mm (200x)*

## 6. CONCLUSÃO

Foi criado, a partir de materiais de fácil obtenção, baixo custo e relativamente de fácil manuseio, um Telescópio de 250 milímetros de diâmetro e 1 metro de distância focal, que para os padrões brasileiros, já é considerado um instrumento de grande abertura. Também desprendemos certa atenção à sua estrutura, fazendo com que fosse leve, rígida e portátil, de fácil montagem e manuseio.

Apoiado no aparente sucesso do funcionamento do instrumento proposto e no desenvolvimento do método para a construção do espelho metálico, bem como na inovação estrutural empenhada até agora, conclui-se que é uma forma prática e viável, levando em consideração o baixo custo, que está discriminado na tabela de custos do Apêndice 3, visto que um equipamento comercial desse porte chega a custar de dez a cem vezes mais.

Por se tratar de uma pesquisa pioneira, há bastante resistência por parte dos construtores de espelhos, mas espera-se que cada vez mais seja possível galgar, mesmo que a pequenos passos, uma oportunidade de divulgar essa vertente.

Constatou-se também que por se tratar de uma pesquisa mais recente, ainda há vários aspectos em aberto, mostrando que outros trabalhos podem dar continuidade ou mesmo abordar outros materiais, como foi proposto aqui com outras ligas (latão, bronze e INOX).



Já o instrumento desenvolvido aqui, possui diversas aplicações para a astronomia amadora, possibilitando fazer registros de trânsitos planetários, ocultações de estrelas por asteroides, fotometria de estrelas variáveis e binárias eclipsantes, ocultações razantes, entre várias outras aplicações.

Há também a possibilidade da adaptação de um espelho secundário e um focalizador comum do tipo crayford, transformando assim em um telescópio óptico para observação direta, suprimindo assim o uso do CCD, que pode ser que tenha uma aceitação mais efetiva no que diz respeito à observações direcionadas ao público.

## Bibliografia consultada

- ALMEIDA, G.; RÉ, P. **Observar o Céu Profundo**. Lisboa: Plátano Editora, 2002. 320 p. il.
- ALMEIDA, G. **Telescópios**. Lisboa: Plátano Editora, 2002. 592 p. il.
- BOCZKO, R. **Conceitos de Astronomia**. 1ª edição. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1984. 429 p. il
- CHERMAN, A. **Cosmo-o-quê?: Uma Introdução à Cosmologia**. Rio de Janeiro: Fundação Planetário da Cidade do Rio de Janeiro, 2000. 192 p. il.
- CHERMAN, A. **Sobre os ombros de gigantes: uma história da Física**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editora, 2004. 199 p. il.
- CHERMAN, A.; MENDONÇA, B. R. **Por que as coisas caem?: uma história da gravidade**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editora, 2009. 245 p. il.
- CHERMAN, A.; VIEIRA, F. **O Céu: histórias e Estrelas**. Rio de Janeiro: Fundação Planetário, 2010. 240 p. il.
- EINSTEIN, A. **A Teoria da Relatividade Especial e Geral**. Rio de Janeiro: Editora Contraponto, 1999. 136 p. il.
- FEYNMAN, R. P. **Física em 12 Lições: fáceis e não tão fáceis**. Rio de Janeiro: Ediouro, 2005. 308 p. il.
- KARAM, H.A. **Telescópios Amadores: técnicas de construção e configuração ótica**. São Paulo: Livraria da Física, 2012, 251 p. il.
- NEWTON, I. **Ótica**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1998. 296 p. il.
- PERELMAN, J.I. **Brincando com Astronomia**. 8ª edição. São Paulo: Editora Fulgor Ltda., 1961. (Coleção Divulgação do Saber, Volume 1, 270 p. il.)
- RIDPATH, I. **Guia Ilustrado Zahar Astronomia**. 2ª edição. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 2008. 300 p. il.
- TEXEREAU, J. **How To Make A Telescope**. Willmann-Bell Inc., 1984, 440 p.

## GLOSSÁRIO

Apresentamos alguns termos técnicos e abreviaturas usados nesse trabalho

### A

#### **aberração esférica**

*aberração em que um feixe de raios paralelos não converge para um mesmo ponto*

#### **abertura (D)**

*diâmetro da objetiva (ou da entrada de luz)*

#### **abertura relativa (D/f)**

*razão entre a abertura e a distância focal (inverso da relação focal)*

#### **abrasivo**

*substância dura para desbaste*

#### **ajustagem**

*etapa do polimento que consiste em ajustar o espelho à ferramenta controlando sua esfericidade e definindo com precisão a distância focal*

### **ATM**

*fabricante amador de telescópios (Amateur Telescope Maker)*

#### **aumento**

*ampliação da imagem; razão entre as distâncias focais da objetiva e da ocular*

### **C**

#### **célula**

*Dispositivo para suporte e fixação e alinhamento de lentes ou espelhos*

#### **centro óptico**

*ponto central de uma lente ou espelho*

### **D**

#### **D**

*diâmetro da objetiva*

**D/f**

*abertura relativa de uma objetiva; inverso da relação focal*

**desbaste**

*etapa do polimento que consiste em escavar o espelho até obter a concavidade desejada, controlada pela medição da flecha*

**distância focal (f)**

*distancia do foco à lente ou ao espelho*

**distância focal efetiva (F)**

*distancia focal final de um sistema óptico*

**E****eixo óptico**

*eixo de simetria, perpendicular a uma superfície óptica*

**esferômetro**

*instrumento para medição de curvatura de superfícies esféricas*

**espelho curto**

*espelho com baixa relação focal ( $f/D = 3 \sim 5$ )*

**espelho esférico**

*espelho com raio de geração constante - calota esférica*

**espelho primário**

*objetiva de espelho, principal coletor de luz do instrumento*

**espelho secundário**

*espelho que reflete a luz concentrada pelo espelho primário*

**F****f**

*abreviatura para distância focal*

**f/**

*abreviatura de  $f/D$*

**f/D**

*relação focal - distância focal dividida pelo diâmetro da objetiva*

**F/**

*abreviatura de  $F/D$  (relação focal final)*

**F/D**

*relação focal final de um instrumento composto de vários elementos ópticos, como os Cassegrains e os catadióptricos*

**ferramenta**

*bloco de vidro ou outro material, geralmente da mesma dimensão do espelho, usado para as operações desbaste e lapidação*

**flecha**

*profundidade no centro de um espelho, medida com um esferômetro ou gabarito calibrado*

**focalizador**

*sistema de ajustagem do foco ou suporte de oculares ajustável*

**Foucault**

*designação genérica do aparelho de Foucault ou do resultado do teste*

**foco**

*ponto teórico de concentração dos raios de luz por um elemento ótico*

**foco primário**

*foco formado pela objetiva*

**G****Go-to**

*sistema computadorizado de apontamento automático de telescópios*

**M****montagem**

*estrutura que suporta o telescópio, geralmente com dois eixos ortogonais*

**montagem equatorial**

*montagem com o eixo principal apontado para o pólo*

**N****Newtoniano**

*telescópio refletor com espelho diagonal plano que desvia a luz para fora do tubo criado por Isaac Newton*

**null test**

*procedimento de teste de espelhos parabólicos curtos  $< F5$  que consiste na inserção de uma lente corretora que torna as imagens similares às de um espelho esférico.*

**O****objetiva**

*lente ou espelho que recolhe e concentra a luz para formar a imagem*

**ocular**

*lupa simples ou composta usada para ampliar a imagem*

**P****parabolização**

*processo de deformação de um espelho esférico até a forma parabolóide*

**parabolóide**

*superfície gerada pela rotação de uma parábola em torno de seu eixo*

**poder de resolução**

*capacidade de um telescópio de separar duas estrelas muito próximas (veja: poder separador)*

**poder separador**

*capacidade do olho de separar dois pontos muito próximos*

**polidor**

*ferramenta macia de polimento*

**polimento**

*desbaste final com ferramentas macias (pitch-lap ou almofadas)*

**pitch-lap**

*ferramenta de polimento fino, feita de betume, breu e cera*

**R****raio de curvatura**

*raio de polimento de uma superfície (no caso de espelhos = 2 f)*

**refrator**

*luneta ou telescópio com objetiva de lentes*

**refletor**

*telescópio com objetiva de espelho*

**relação focal**

*f/D ou f/ - razão entre a distância focal e a abertura (inverso da abertura relativa)*

**relação focal final**

*F/D ou F/ - razão entre a distancia focal final resultante de um sistema óptico composto por vários elementos e a abertura.*

**Ronchi**

*sistema de teste óptico que usa uma grade reticulada*

**ronchigrama**

*resultado do teste de Ronchi*

**S****soda-lime**

*(do inglês) vidro comum feito a base de óxido de silício com a adição de óxido de sódio e óxido de cálcio*

**string**

*sistema fios que sustentam a estrutura de um telescópio*

**T****truss-tube**

*(do inglês) tubo treliçado para telescópios*

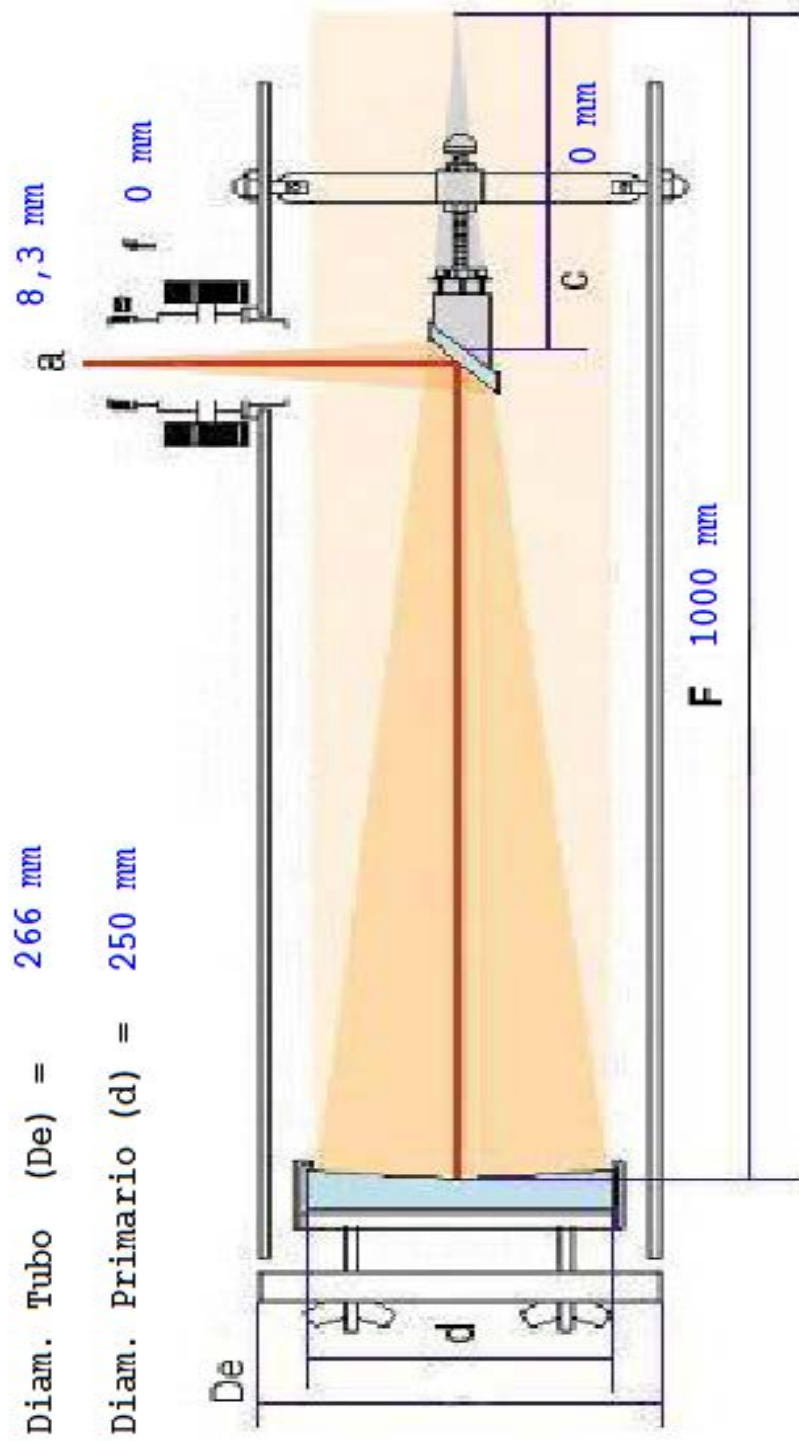
**V****vinhetagem**

*(do francês) escurecimento das bordas do campo devido à obstrução dos raios periféricos do cone de luz*



## APÊNDICE A

## Croqui inicial para geração da calota esférica



## APÊNDICE B

### Confecção manual de espelhos de Alumínio

A aproximadamente 3 anos o grupo ATM Metal Mirror vem se dedicando na pesquisa e desenvolvimento de métodos para a confecção de espelhos de alumínio com polimento direto para uso na astronomia amadora.

O que vamos mostrar aqui , é um método bem sucedido para confecção do espelho de alumínio e que usa procedimentos diferentes dos métodos tradicionais.

É sabido historicamente a grande dificuldade para o polimento optico do alumínio quando usamos métodos tradicionais , muitos deles iguais aos usados em espelhos de vidro. Para contornar esse problema foi comum o uso de uma camada de níquel sobre o espelho.

Entretanto se abordarmos de uma outra forma esse problema do alumínio, aplicando métodos que tratem o alumínio como metal e não como vidro, é possível o polimento optico com boa qualidade em espelhos para telescopios.

Alguns esclarecimentos iniciais são importantes :

Os procedimentos aqui descritos se referem a um método de confecção manual, e o espelho será polido e figurado somente com os movimentos das mãos sem uso de maquina, por isso ele é adequado na fabricação de espelhos até 250mm de diametro.

O procedimento aqui descrito, será dividido em 3 partes:

1. Escolha do alumínio. Métodos de geração inicial da curva no espelho e na ferramenta  
Desbaste usando abrasivo em pó para fazer a esfera do espelho e da ferramenta, no caso o Carbureto de Silício de granulometria #80 (SiC #80)
2. Ajustagem usando lixas comerciais a prova dagua com granulaturas 280, 320, 360, 600.
3. Lapidação e polimento, usando lixas caseiras feitas de tecido Tafetá e abrasivos SiC granulatura 500, 1000, 1500. Finalizando o polimento com Alumina coloidal 0,5 micron ou óxido de Cério.

### **Escolha do alumínio . Métodos para fazer a curva inicial.**

A liga de alumínio que melhor preencheu os requisitos para uso em espelhos amadores foi a liga da série 6XXX (a mais comum é a #6351 T6) por ser facilmente encontrada e de baixo custo. Apresenta dureza intermediária, ou seja, não é muito macia e também não é muito dura. Ideal para a confecção do espelho usando as mãos e possui uma liga de qualidade microestrutural e apresentou um polimento final satisfatório.

Com os dois discos cortados na espessura desejada é necessário agora fazer a curva inicial nos discos. Uma curva concava no espelho e uma curva convexa na ferramenta. Essa curva deverá ser feita de acordo com o raio de curvatura do espelho, previamente escolhido. Para sabermos o quanto desbastar, usamos um programa para calcular os parâmetros gerais do telescópio chamado TelNewton.

A curva inicial é feita usando abrasivo em pó grão #80 e #220. Espelho por cima da ferramenta fazendo movimentos retos em formatos poligonais, isto é, esfregar o centro do espelho na borda da ferramenta, sempre girando ambos a cada ataque.

Após o desbaste inicial com o SiC #80 e atingida a profundidade esperada, temos que agora acertar essas curvas usando o abrasivo SiC#220, agora com movimentos de zigzag com deslocamento lateral de cerca de  $\frac{3}{4}$  do diâmetro e amplitude de  $\frac{2}{3}$ . Nessa fase, coloque um pouco de detergente na lama abrasiva, pois facilita o processo.

Concluída a etapa de esmerilhamento, é preciso agora retirar as maracas e riscos deixados pelo abrasivo e assim preparar a superfície do espelho para o desbaste fino.

Essa etapa é feita com o uso de lixas comerciais, preferencialmente com lixas a prova d'água. Tivemos muito sucesso com o uso das lixas da marca 3M com o costado 211Q. As lixas serão usadas na seguinte sequência: #280, #320, #400 e finalmente a #600.

Bom, aqui começam as diferenças entre o procedimento tradicional de confecção de espelhos, e o método para confecção do espelho de alumínio fazendo polimento direto.

Algumas considerações importantes: o alumínio é um metal relativamente macio e cria sempre que esmerilhado ou polido, uma camada natural de óxido

transparente de alguns nanômetros de espessura, e de uma dureza muito grande . Um dos segredos do polimento direto do alumínio é fazer com que essa camada natural de óxido, fique inibida o máximo possível durante o polimento e também é importante lubrificarmos a solução para que seja diminuído ao máximo a formação de riscos na superfície do espelho.

A ferramenta com a lixa presa a ela deverá ficar submersa nessa solução lubrificante. O nível da solução de água com detergente , deverá estar ligeiramente acima da ferramenta . Um ou dois milímetros já são suficientes.

Tivemos muito bom resultado com detergentes líquidos com o componente ativo Linear alquilbenzeno sulfonato de sódio, e melhor ainda com os que tinham glicerina em sua composição. Normalmente quando o detergente é bom para o esmerilhamento , no estágio lixa #600 o espelho apresenta bastante reflexão e brilho.

O detergente a ser usado deverá ser sempre do tipo líquido, e a quantidade é aproximadamente 10ml de detergente para um litro de água na solução.

Para o trabalho inicial com as lixas, precisaremos de uma vasilha o suficiente grande para acomodar a ferramenta em seu centro. A ferramenta com lixa deverá ficar bem presa para que não escorregue com os movimentos de esmerilhamento.

Começaremos com o uso da lixa #280. Essa lixa irá remover a maior parte dos grãos que ficaram encrustados durante o procedimento anterior de esmerilhamento grosso com o abrasivo #220 em pó.

Os movimentos agora são de centro a centro e sempre girando o espelho para não criarmos astigmatismo. (Os movimentos são os mesmos clássicos de figuração de espelhos esféricos e podem ser conferidos em [www.observatorio-phoenix.org](http://www.observatorio-phoenix.org))

Após o uso da lixa 280 quando notarmos uma boa limpeza na superfície do espelho, passaremos a usar a lixa 320 e assim por diante até a #600. Assim que o espelho apresentar alguma reflexão, devemos levá-lo para uma verificação no Ronchi (vide [www.observatorio-phoenix.org](http://www.observatorio-phoenix.org)). No estágio da lixa #600, devemos deixar o espelho o mais esférico possível, ou seja, com as linhas retas no teste de Ronchi. Podemos usar nesse estágio de teste, uma grade com 50 a 100 linhas por polegada.

Terminado o trabalho com as lixas, vamos entrar agora no estágio intermediário em que usaremos lixas caseiras feitas de tecido Tafetá. Prenda de

forma a não deixar rugas ou pontos frouxos o tecido na ferramenta. Prepare uma solução com cola PVA / Álcool (cola de isopor) misturada ao abrasivo SiC#500, depois o #1000 e finalmente o #1500 (é importante trocar o tecido, obviamente). Espalhe a mistura uniformemente pelo Tafetá e aguarde a secagem. Esse estágio corresponde ao esmerilhamento fino, em que vamos deixar a figura do espelho pronta para o polimento final com alumina coloidal 0,5 micron ou o óxido de Cério.

Terminado essa lapidação com as lixas caseiras, o alumínio já deve apresentar boa refletividade, sendo que agora é necessário apenas suavizar um pouco a superfície.

Construa agora uma nova ferramenta, feita com massa plástica e moldada em seu espelho. Use óleo fino de máquina para que a massa não grude no espelho. Após a secagem, deve ser fácil de desgrudar.

Com o tecido bem esticado, envolva a ferramenta (parte convexa) com o tecido e faça uma outra solução, dessa vez acrescente menos abrasivo. Espalhe de maneira bem uniforme com um pincel e aguarde a secagem.

Nessa etapa, os movimentos são bem pequenos, com deslocamento lateral de 2 a 3 centímetros e amplitude de 2 centímetros, criando assim um zigzag. Teste seu espelho a cada 15 minutos.

Assim que atingir uma boa figura óptica, lave bem com água corrente e com ajuda de um pedaço de cetim com uma gota de solvente (tipo tinner) passe levemente na superfície deixando secar naturalmente.

Pronto. Agora você possui um espelho de telescópio de qualidade.



*Grupo de construção de espelhos de Alumínio fundado em Rio Claro, São Paulo em 2011.*

## APÊNDICE C

### Tabela de valores

	Descrição	Quantidade	Valor (R\$)
1	Bloco de Alumínio #6531 T6	1	80,00
2	Madeiras para a Célula do primário	1 m <sup>2</sup>	17,00
3	Cabo de vassoura	2	6,00
4	Cabo de aço encapado	6 m	4,00
5	Roda Aro 16	1	17,00
6	Carcaça de Cubo rolamentado	1	7,00
7	Tecido tafetá	0,5 m	9,00
8	Massa plástica	5	35,00
9	Manoplas	3	5,00
10	Cola PVA/Álcool	3	9,00
11	Parafusos	-	5,00
12	Total	-	194,00

Observação: Não está incluso nesta tabela o custo da hora de um torno CNC, já que o serviço foi uma parceria entre UNESP e SENAI mas a hora de torno CNC gira em torno de R\$120,00.

Custo total ficou em torno de R\$200,00

Um telescópio com essa configuração sai por cerca de R\$2600,00

<http://armazemdotelescopio.com.br/loja/index.php/telescopios/bkdob10-detail>

isso mostra a praticidade e possibilidade criarmos telescópios de Alumínio.

## APENDICE D

### O Esferômetro

#### 1. Concepção

Como o trabalho de confecção de espelhos envolve medidas precisas, alguns instrumentos e aparelhos se fazem necessário. Um dos mais usados e que se fez imprescindível foi o esferômetro, instrumento que mede a esfericidade de calotas esféricas côncavas ou convexas, de forma a fornecer o raio destas calotas.

Para este trabalho, o raio de curvatura é igual ao dobro da distância focal do espelho primário, informação imprescindível para a continuidade das fases de desbaste e polimento. A seguir será descrita a construção deste instrumento.

#### 2. Materiais

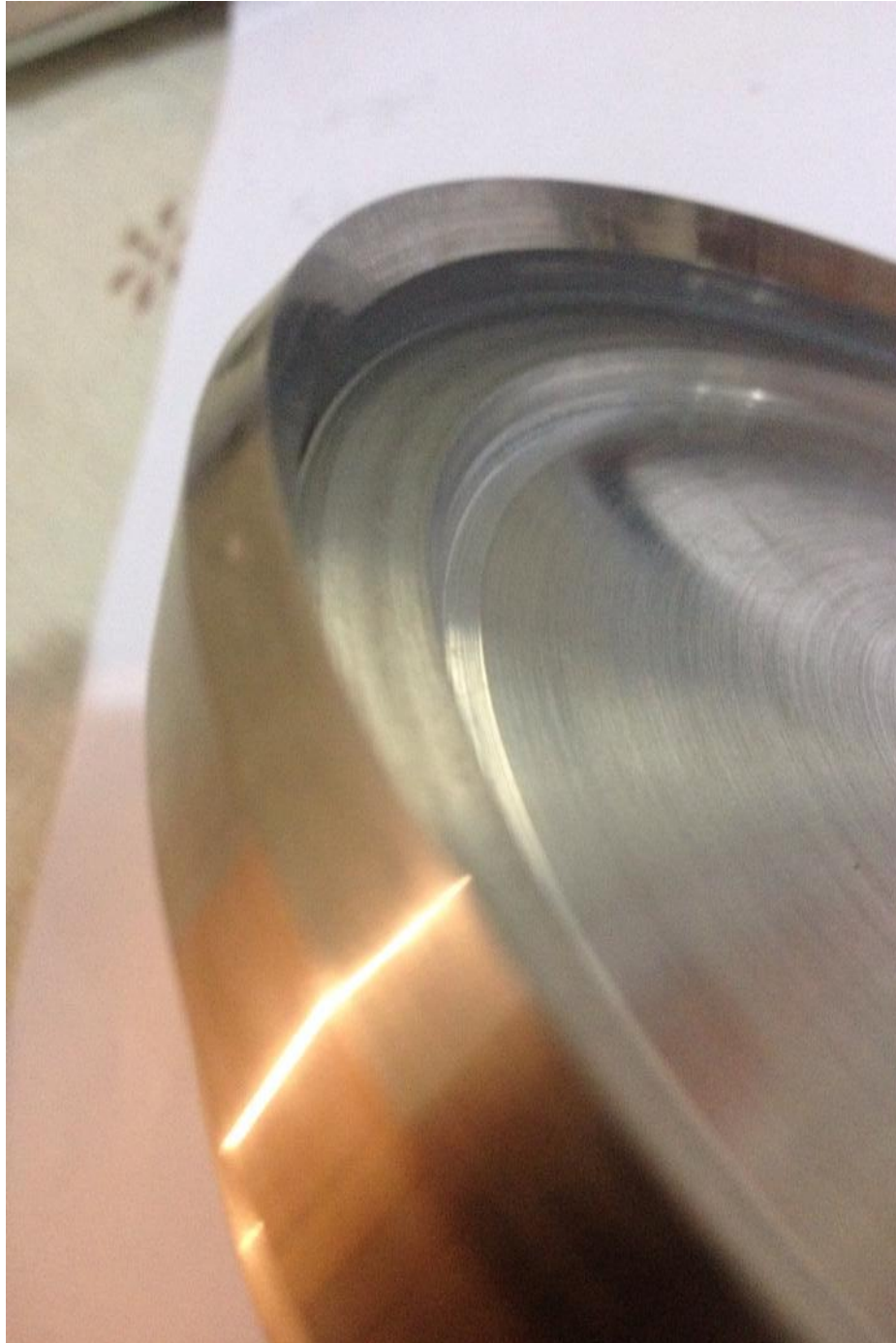
Definiu-se um diâmetro máximo de 140 milímetros. Para isso, foi adquirido um disco de alumínio de 5,5 polegadas (139,7 mm) onde foi encaixado um anel de aço INOX (que apresenta uma dureza muito superior ao alumínio) para que fosse usinado uma estrutura de copo. Foi adquirido um relógio comparador Mitutoyo 2046F com precisão de 0,01 mm para ser acoplado no centro do copo retificado. Os materiais utilizados foram:

- Disco de Alumínio de 5,5 polegadas (139,7 mm)
- Anel de aço INOX de 120 mm de parede interna
- Relógio comparador Mitutoyo 2046F com precisão de 0,01 mm
- Parafuso allen sem cabeça de 1/8 de polegada.

Nas imagens a seguir será possível visualizar melhor como foi feita essa montagem.

### 3. Construção

Depois de usinadas as peças, foi feita a montagem com adesivo Araldite para unir as duas peças metálicas. Depois de curadas, foi usinada uma borda em forma de faca (“V”) como pode ser visto na figura abaixo:

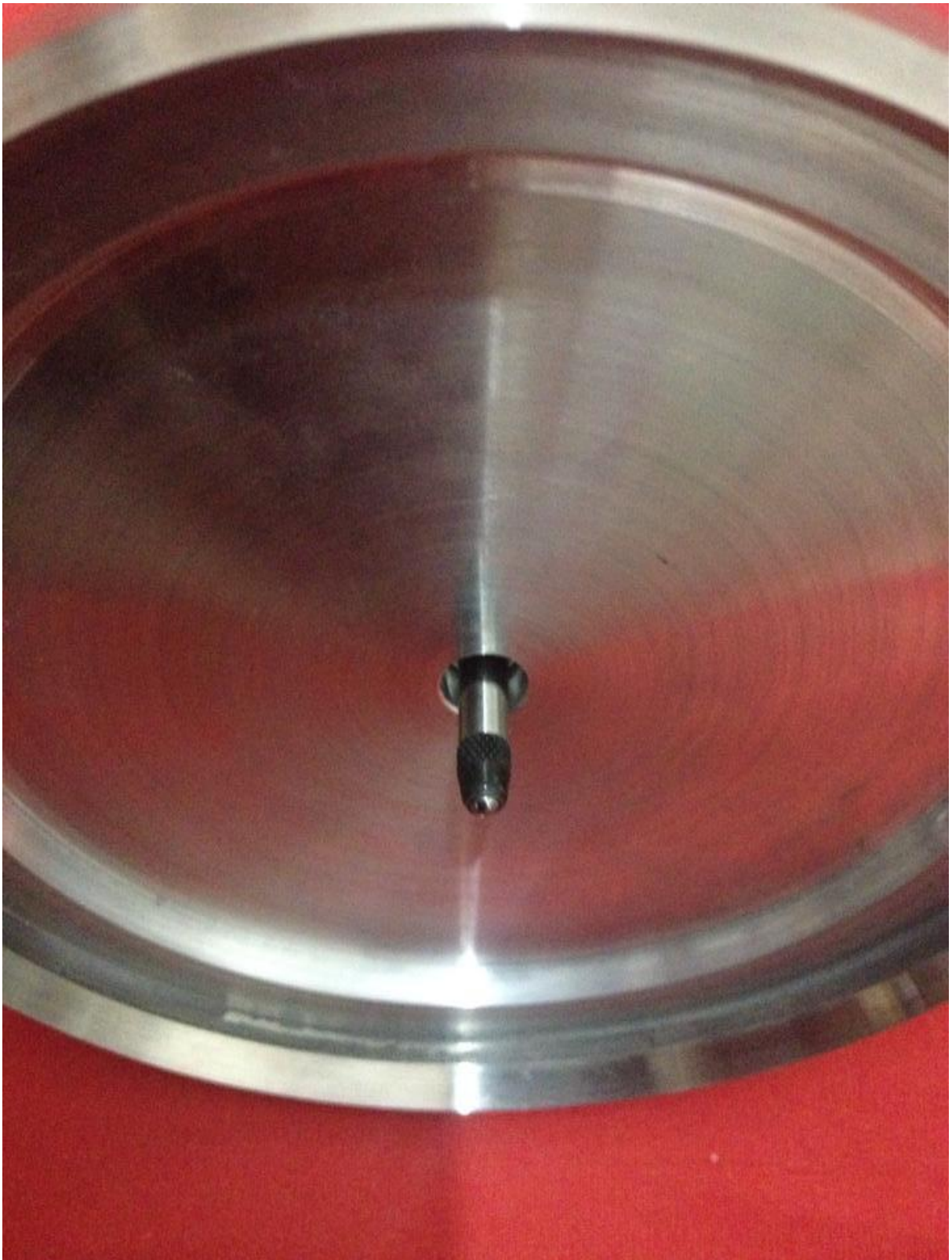


O aspecto final já com o relógio comparador é como mostra a imagem a seguir:





E aqui uma visão da parte inferior, mostrando a haste do relógio comparador:



#### 4. Calibração

Antes de calibrar o esferômetro é necessário zerá-lo. Usa-se uma mesa de desempenho para esta finalidade, que é bem retificada, onde o erro dela é inferior ao do relógio. Um acesso a uma retífica foi gentilmente cedido pelos funcionários da Retífica e Usinagem Brasil Ltda. Lá depois de cerca de 10 medidas com o ponteiro variando apenas estatisticamente do zero, conclui-se que o aparelho já é capaz de analisar uma superfície plana.

Então, usou-se neste caso um espelho de telescópio de referência, com precisão muito superior à do instrumento em questão, de forma que o raio de curvatura deste espelho é muito bem definida. Feito isso, faz-se o cálculo indireto do raio efetivo do esferômetro através da Equação geral dos esferômetros:

$$R = \frac{1}{2} \left( h + \frac{d^2}{h} \right)$$

Onde h é a leitura, d é o diâmetro (2r) e R é o raio de curvatura da calota medida. Assim conseguiu-se o valor de r como sendo

$$r = 64,09880659 \text{ mm.}$$

Para a fórmula simplificada que foi adotada é:

$$R = \frac{r^2}{2h}$$

Com  $r^2 = 4108,657006$  como constante esferométrica.




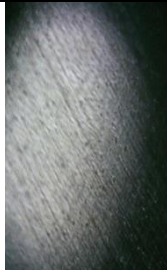
## APÊNDICE E

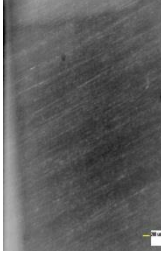

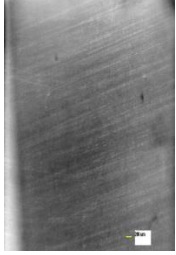
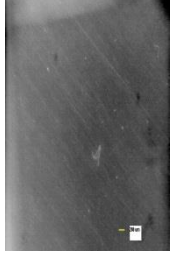
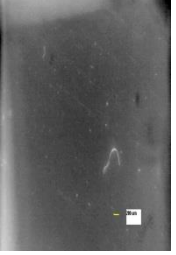












### Testes com ligas de Alumínio

Neste apêndice busca-se elucidar o processo da escolha do melhor alumínio para um polimento óptico, sendo que há diversas ligas disponíveis no mercado, porém nem todas satisfazem a refletividade e suavidade na superfície polida necessária para um espelho de telescópio. Para isso, diversas ligas em forma de chapa e vergalhão foram exaustivamente testadas e submetidas a muitos testes de polimento, corrosão e oxidação.

A tabela abaixo demonstra as ligas testadas e seus respectivos métodos para polimento com fotografias para ilustrar, que foram obtidas através de um estereoscópio caseiro (lupa), com iluminação direcionada de LED. Depois de muitos teste, foi padronizado as lixas d'água, sendo que a melhor para este fim foi as da 3M, com costado 211Q, que apresentou uma trama bem resistente e que menos influenciava nos resultados.

Em duas das imagens da liga do #6351 há uma fibra. Esta é apenas um daqueles pelinhos que ficam depois de passar um papel para secar a superfície. É uma pequena fibra de papel onde foi focado para exemplificar melhor o polimento adquirido por essa liga, que de todo o teste, foi a que se mostrou mais fácil e com melhor superfície.

Liga	Lixa #400	Lixa #600	Lixa #1200	Lixa #2000	Polidor de Cério
#3105					Não foi feito!

#5052					
#6063	<p>Muito mole! Não é possível obter uma superfície óptica. Superfície se mostra irregular.</p> 				
#6101	<p>Muito mole! Não é possível obter uma superfície óptica. Superfície se mostra irregular.</p> 				
#6262					
#6351					

## ANEXO A

### O espelho paraboloide

Todas as informações e referências de figuras e esquemas deste apêndice podem ser encontradas no site do autor em:

<http://www.observatorio-phoenix.org.br>

Quando decidimos construir um telescópio mais curto, isto é, com uma relação focal ( $f/D$ ) menor que o valor limite calculado (menor que 7,9) nos deparamos com os problemas da aberração esférica (figura I). A construção de um telescópio mais curto pode ser imposta por limitações de tamanho do tubo, incluindo aí a construção de um arranjo Cassegrain, ou simplesmente a obtenção de um aparelho mais luminoso, para a observação de cometas, galáxias e nebulosas. Desde que ele não seja muito curto, o polimento de um espelho parabolóide não apresenta grande dificuldade.

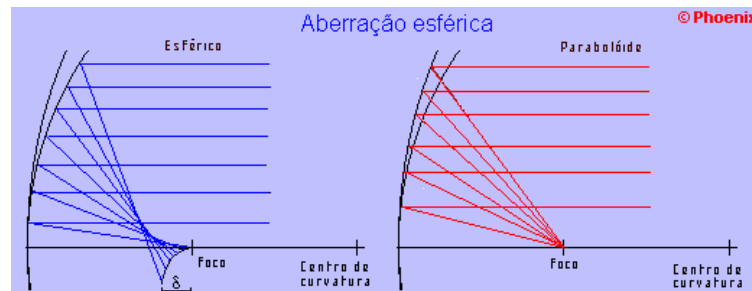


Figura I: Esquema geométrico da aberração esférica

A aberração esférica forma em torno do ponto focal de um espelho uma imagem deformada de um objeto suposto no infinito, não num plano, mas numa superfície cáustica (figura II), como uma corneta. Esta superfície é gerada pela rotação, em torno do eixo óptico, da curva que contém os focos de cada raio luminoso à medida que o diâmetro da objetiva aumenta. Esta aberração cria uma imagem completamente distorcida do objeto, impossível de ser visualizada.

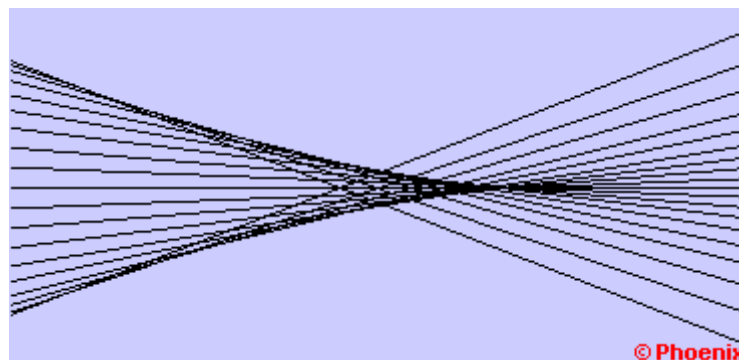


Figura II: a cáustica – impossibilidade de um foco único

Para corrigir este problema, seremos obrigados a deformar a objetiva, de modo a compensar o deslocamento dos focos individuais e juntá-los no ponto focal. A curva matemática que atende a este requisito é a parábola. Assim nossa objetiva será uma superfície parabolóide, ou melhor, um parabolóide de revolução. A maioria dos livros faz referência a uma superfície parabólica, o que a rigor não existe. A parábola é uma curva plana! Do mesmo modo não deveríamos dizer "antena parabólica" e sim "antena parabolóide", já que ela tem três dimensões.

A diferença entre um espelho parabolóide e um esférico é mínima: cerca de 0,4 milésimos de milímetro mais abaixado nas bordas para um espelho de 180 mm  $f/D=6$ . Se medido pelo raio médio de curvatura, a diferença se reduz a  $1/4$  deste valor (figura III). Se dois espelhos destas dimensões, um esférico e um parabolóide, forem colocados lado a lado, é praticamente impossível por meio de instrumentos mecânicos (paquímetros, micrômetros ou esferômetros) identificar cada um. Somente um instrumento óptico poderá medir a diferença. A parabolização de um espelho não consegue alterar a sua relação focal.

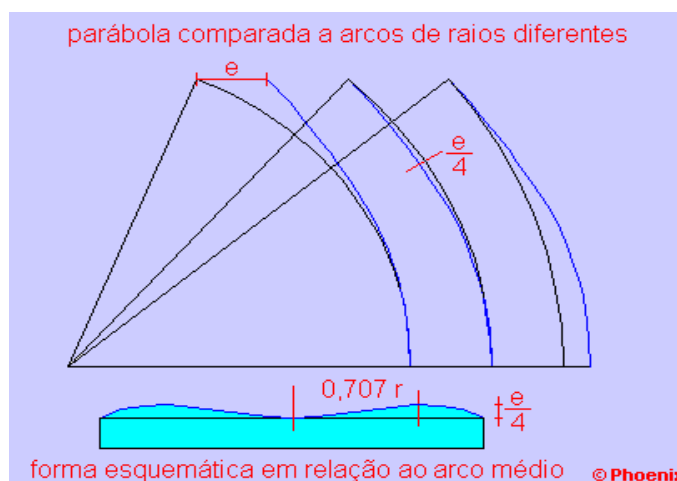


Figura III: em azul está o traço da parábola e em preto, um segmento de arco de raio constante. Nota-se que a parábola fica bem próxima em alguns pontos, mas para diferentes raios.

Segundo Jean Texereau, a partir de um espelho esférico poderemos fazer a parabolização de três maneiras distintas:

1. O método clássico consiste em fazer movimentos específicos do espelho sobre o "pitch-lap" como na figura IV. Se necessário afundar o centro, concentre mais cursos sobre as bordas da ferramenta. Para abaixar a borda, concentre os cursos no centro da ferramenta. A cada dez minutos de trabalho, pare e teste o espelho.

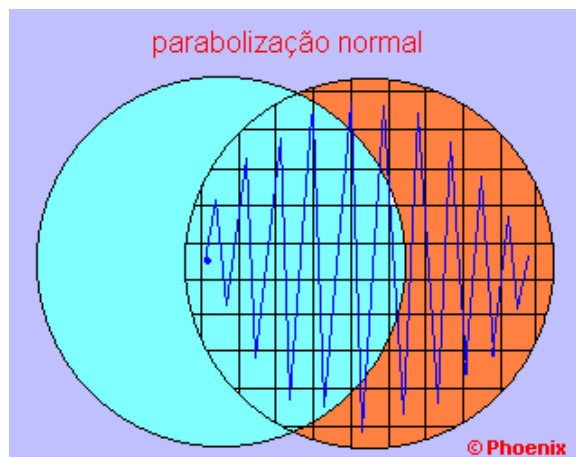


Figura IV: Movimento básico de parabolização. Em azul o caminho descrito pelo centro do espelho, que é colocado por cima da ferramenta de polimento, o pitch-lap.

2. Uma alternativa, especialmente útil para espelhos de grande diâmetro, é usar uma ferramenta menor sobre o espelho. Faça um "pitch-lap" com metade do diâmetro do espelho e trabalhe sobre as regiões indicadas (figura V). Este método tem a desvantagem de aumentar as micro-ondulações na superfície e é mais demorado, mas torna o trabalho mais leve. Teste o espelho a cada 15 minutos de polimento.

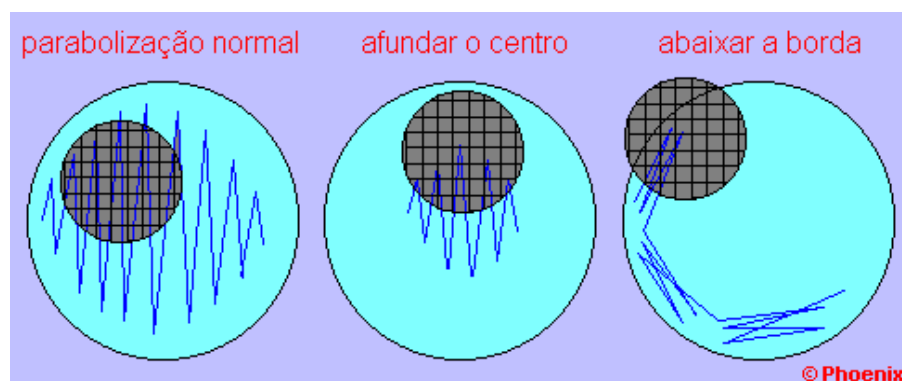


Figura V: Correções da parábola. São feitas com o espelho por baixo e uma ferramenta menor por cima. Em azul, o caminho do centro da ferramenta sobre o espelho.



3. O método de compressões é usado tanto na parabolização como nas correções de parábolas defeituosas. Consiste em usar o "pitch-lap" sobre o espelho, exercendo a pressão das mãos para obter o efeito desejado. Para afundar o centro pressione a mão que está sobre o centro do espelho (figura VI). Os cursos devem se limitar a 1/3 do diâmetro. Para rebater a borda trabalhe sobre a borda do espelho usando pressões iguais das mãos. A cada dez minutos, pare o polimento e faça o teste do espelho.

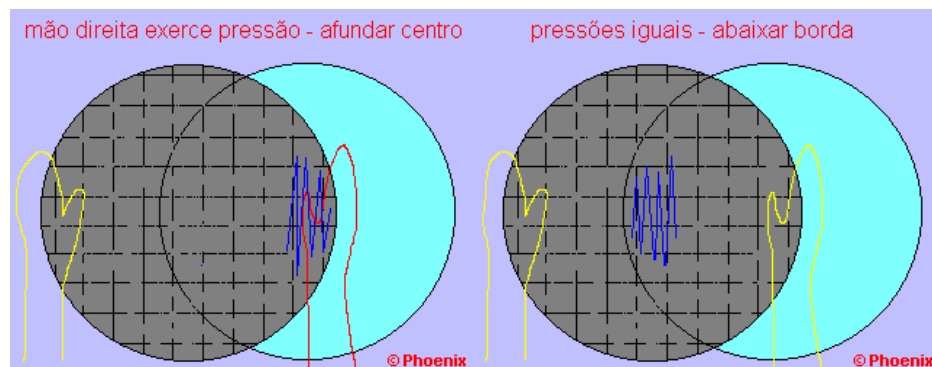


Figura VI: método de compressão. Com a ferramenta por cima, fazer pressão com a mão direita caso queira afundar o centro. Pressões iguais caso queira abaixar a borda.

Mas como poderemos medir e avaliar as deformações do espelho? Vamos medir a deformação da superfície focal e comparar com os valores teóricos calculados para a nossa objetiva. Nos espelhos de telescópios aquela superfície cáustica tem uma pequena "profundidade"  $d$ , que pode ser calculada pela fórmula:

$$\delta = \frac{h^2}{R}$$

Onde  $h$  é a distância do centro e  $R$  o raio de curvatura da superfície do espelho (o dobro da distância focal). Se um espelho esférico cria esta aberração para um objeto no infinito, o inverso também é verdadeiro: um espelho parabolóide irá criar a mesma aberração para um objeto colocado no centro de curvatura, só que invertida. Nós vamos usar esta característica para medir nosso espelho. Usaremos uma escala graduada em milímetros fixada ao lado do parafuso de deslocamento da mesa do aparelho de Foucault para medir cada zona de incidência da luz e corrigir a curvatura se necessário. Como o passo do parafuso é de um milímetro e o disco graduado foi dividido em 10 setores, poderemos obter leituras de 0,1 mm.

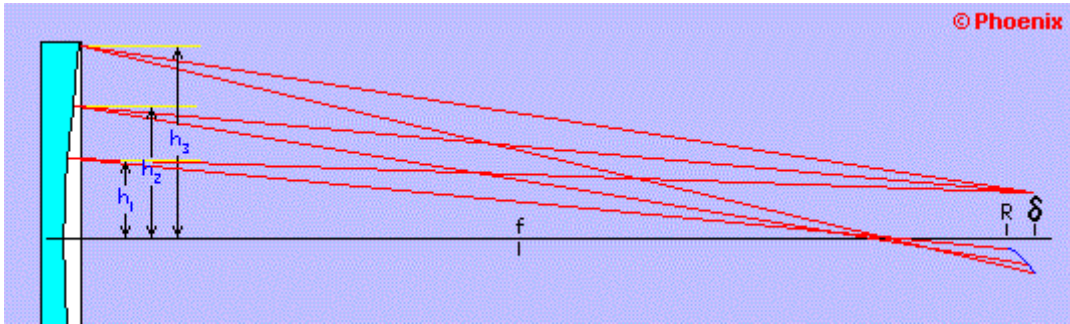


Figura VII: Geometria dos diferentes focos na parábola. Para definir isso melhor, criamos uma máscara para cobrir o espelho e podemos analisar cada região separadamente.

Como seria muito difícil uma medida para cada valor de  $h$ , o teste do espelho será feito por zonas, e usaremos o valor médio de cada zona  $h_m$  para os cálculos. O número de zonas não deve ser muito grande, senão a largura de cada zona ficaria muito estreita, o que poderia prejudicar sua visibilidade. À medida que nos afastamos do centro do espelho a zona medida tem uma área maior, e assim uma maior influência sobre a imagem. Para aumentar a precisão da medida faremos então zonas progressivamente mais estreitas, mantendo um limite mínimo de 15 mm para a borda. Para testar um espelho de 180 mm -  $f/D=6$ , poderíamos adotar, por exemplo, 4 zonas de 30, 55, 75 e 90 mm de raio a partir do centro. O raio de curvatura seria  $R = 2 \times 6 \times 180 = 2.160$  mm.

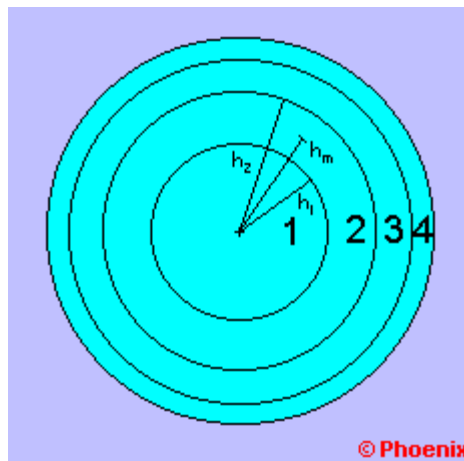


Figura VIII: Definindo as regiões de um espelho parabólico.

Para calcular os valores de  $d$ , basta encontrar o valor médio  $h_m$  para cada zona, o valor de  $R$  e aplicar na fórmula. Feito isso teremos:

Zona	h	$h_m$	d
1	30	15,0	0,1
2	55	42,5	0,8
3	75	65,0	2,0
4	90	82,5	3,2

Figura IX: tabela com os valores das áreas do espelho já divididas.

Como podemos ver, a diferença entre os pontos focais é de apenas 3,1 mm. Baseado nestes dados podemos agora construir uma máscara com janelas definindo cada zona. Alguns amadores preferem usar apenas uma régua com indicadores das zonas, mas o sistema de janelas é mais preciso.

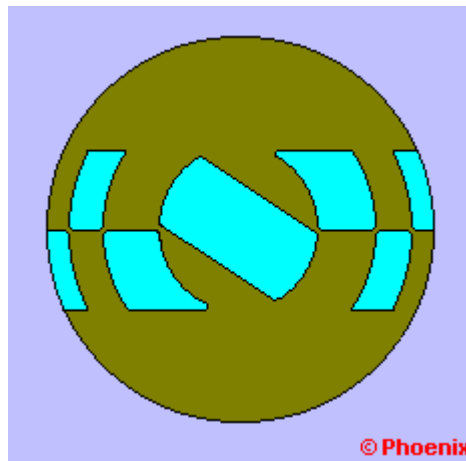


Figura X: máscara de Coudé. Facilita a leitura de cada setor do seu espelho através dessas janelas.

Esta máscara será colocada sobre o espelho durante o teste. No caso do espelho esférico, vimos que toda a superfície era escurecida simultaneamente quando a faca era posicionada sobre o foco. No espelho parabolóide temos um "foco" distinto para cada zona. Vamos procurar então o ponto onde as janelas simétricas tenham a mesma tonalidade e fazer a leitura. Use uma seqüência coerente e faça anotações das medidas obtidas. Como o posicionamento do aparelho de Foucault pode variar a cada teste, usaremos sempre o valor relativo das medições. Para isso basta definir uma das zonas como padrão, encontrar o valor da diferença para o valor desejado e somar ou subtrair da diferença. Deste modo encontraremos os valores para cada zona. Uma folha de teste deve ser numerada,

datada e preenchida para cada ensaio, de modo a permitir o acompanhamento do trabalho e sua evolução.

### A folha de controle

A folha de controle deve ter um quadro para as anotações dos dados básicos, dos valores medidos e das correções feitas. Estes dados nos permitirão avaliar o perfil do espelho e programar as correções.

teste #	19					
Diâmetro	180			Data	18/ago/03	
f/D	6			hora	15:35	
R	2160					
Zonas	1	2	3	4		
vr. calculado	0,1	0,8	2,0	3,2		
vr. medido	12,5	13,1	13,8	14,5		
-12,3	0,2	0,8	1,5	2,2		
$\Delta$ vc-vm	-0,1	0,0	+0,5	+1,0		

1	2	3	4
---	---	---	---

Figura XI: exemplo de uma folha de controle da parábola.

Na folha de controle anotamos os valores calculados e os valores relativos medidos. Escolhemos arbitrariamente a Zona 2 para referência e encontramos o valor da diferença vr.medido - vr.calculado de 12,3. Poderíamos ter escolhido qualquer outra zona para esta referência, mas escolha uma que distribua melhor os erros. Subtraindo este valor de todas as medições vamos encontrar o valor absoluto para cada zona. Na linha seguinte calculamos as diferenças **D**, subtraímos o valor medido e encontramos as distorções. Estes valores nos permitem traçar um semiperfil do espelho. Quando o valor é negativo significa que a distância focal está maior que a desejada, assim traçamos uma linha descendente na zona 1. Na zona 2 o valor é o de referência, logo nosso perfil será plano. O valor positivo para a zona 3 nos indica uma distância focal menor que a buscada, traçamos uma linha ligeiramente ascendente. Finalmente o valor da zona 4 é positivo e relativamente

grande, traçamos uma linha ascendente com uma inclinação proporcionalmente maior. Este perfil não obedece rigorosamente as dimensões, mas nos dá uma excelente idéia da forma atual do nosso espelho: uma borda alta! e nos ajuda a planejar as próximas ações corretivas.

Anote o que deve ser feito e escolha o tipo de movimento mais adequado para correção de uma borda alta. Trabalhe de 5 a 10 minutos e faça novo teste. Estas anotações serão importantes para avaliar o resultado de cada ação. É comum tentarmos uma correção e agravar o problema. A experiência adquirida é que nos vai permitir evoluir para a forma desejada.



Figura XII: Guia de retoques possíveis.

Nosso objetivo será o de obter um erro máximo na faixa de cinco centésimos de milímetro antes de fazer a análise final.