



POLIMENTO E ESPFLHAMENTO DE COMPONENTES ÓPTICOS

ALUNO: FERNANDO ANTONIO PIRES VIEIRA

PROFESSOR ORIENTADOR: SILIC VAZ

SUMÁRIO

Agradecimentos	1
Palavras Chave	4
Introdução	4
Resumo	4
Desenvolvimento	6
Conclusão	35
Bibliografia	36

Dedico este trabalho a todos
os colegas do curso de Astronomia

Agradecimentos

É com o maior prazer que torno público o meu reconhecimento a todos aqueles que tornaram possível a realização deste projeto. Agradeço em particular, à:

Sílvia Vaz (OV)
Luiz Eduardo da Silva Machado (OV)
José Adolfo S. de Campos (OV)
Horácio Macedo (IQ)
Mauro dos Santos de Carvalho (IQ)
J. Bassani (IF)

~~FAPV~~

NA forma moderna de vida, comer não se constitui num problema, usualmente. Se eu sinto fome e estou em casa, vou à geladeira; se estou fora de casa, vou a um restaurante qualquer. Mas, a situação será diferente se a geladeira estiver vazia ou se eu estiver sem dinheiro; neste caso, comer torna-se um problema.

De maneira geral, um mesmo desejo pode originar, ou não, um problema. Se, concomitantemente com o desejo, surge ao espírito, sem nenhuma dificuldade, um comportamento evidente que permita, efetivamente, alcançar o objetivo desejado, não há problema. Se, ao contrário, um tal comportamento não é vislumbrado, há um problema.

Resolver um problema significa, portanto: procurar, de maneira consciente, uma linha de ação visando a atingir um fim claramente concebido, mas não imediatamente acessível. Um problema é grande, se é difícil; é pequeno, se é fácil. A noção mesma de problema, portanto, contém a de um certo grau de dificuldade: não há problema onde não há dificuldade.

Um problema típico é a procura dum caminho que leve a um ponto determinado, numa região pouco conhecida. Pode-se imaginar, sem dificuldade, o que tal problema deve ter sido para nos nos ancestrais que habitavam a floresta virgem. Talvez por esta razão é que a solução de um problema nos pareça um pouco como a procura dum caminho: um caminho através duma dificuldade, um caminho para contornar um obstáculo.

A maior parte da atividade do nosso pensamento consciente é orientada por problemas. Nossos pensamentos são dirigidos para um certo fim: salvo quando nos entregamos ao devaneio, procuramos vias e meios de atingir um objetivo.

Resolver problemas é tarefa da inteligência, e a inteligência é própria do homem. A habilidade de contornar um obstáculo, de adotar um processo indireto quando não é vislumbrado um direto, eleva o animal arguto acima do animal estúpido, o homem bem acima do animal arguto e os homens de gênio acima de seus congêneres. Nada é mais interessante que o estudo da atividade humana. E a atividade mais tipicamente humana é a de resolver problemas, de refletir com uma intenção, de imaginar meios de realizar um projeto.

POLYA, G. - LA DÉCOUVERTE DES MATHÉMATIQUES.
Paris, Dunod, 1967. Vol. 2. p. 131-132.

colocar no máximo 3 palavras-chave

-4-

POLIMENTO E ESPELHAMENTO DE COMPONENTES ÓPTICOS

PALAVRAS CHAVE: Telescópio, Figuração, Alisado, Polimento, Teste de Fizeau, Teste de Foucault, Parabolização, espelhamento.

INTRODUÇÃO: O presente projeto tem como objetivo principal incentivar a criação de um laboratório óptico no Observatório do Valongo. Suas finalidades seriam a manutenção e fabricação de componentes ópticos que teriam, como consequência imediata, a redução da dependência externa nesse setor, além de poder construir, in loco, instrumentos que venham a cobrir as nossas necessidades sem as, quase sempre, adaptações e sem ficar à mercê da importação de peças e técnicos de interesse excessivamente comercial.

Como teremos oportunidade de ver, haverá possibilidade de se construírem peças de reflexão de até 50 cm sem muita dificuldade e a custo bastante razoável. Peças maiores implicam em dificuldades, não de caráter óptico, mas mecânico.

É indiscutível a importância que a Óptica tem para a Astronomia. Esse ramo da Física é justamente o mais abandonado em termos de pesquisa no Brasil. A falta de técnicos, nesse setor, pode ser evidenciada pela dificuldade que tive em esclarecer as minhas dúvidas, a maioria respondidas: "errando até acertar".

RESUMO: Nosso desenvolvimento divide-se em duas partes: Na primeira, iremos tratar da confecção de espelhos esféricos, parabólicos, hiperbólicos, elípticos e planos. Citaremos, em primeiro lugar, o material empregado: abrasivos e outros produtos químicos. A seguir, trataremos dos movimentos utilizados para se adquirir a figura desejada. A fase seguinte será a de testes corretivos, visto que muito raramente conseguimos a figura desejada no polimento. Nesses testes, obteremos uma superfície com precisão superior a $\lambda/20$. Em seguida, trataremos da parabolização, movimentos e testes, e igualmente das superfícies planas, movimentos e testes. Na segunda parte, iremos tratar da espelhação.

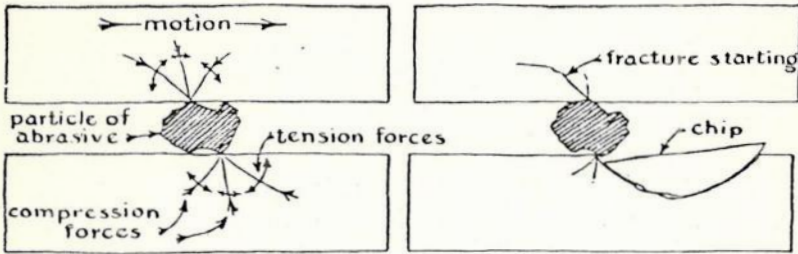


Fig. 1

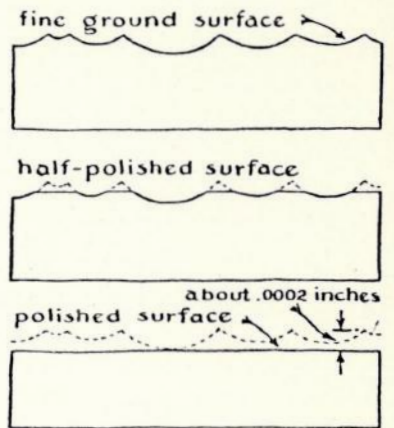
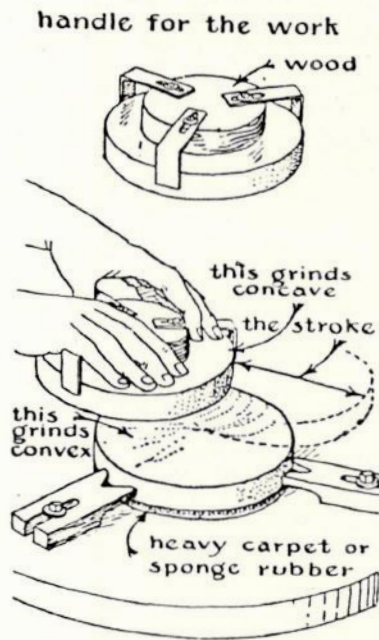
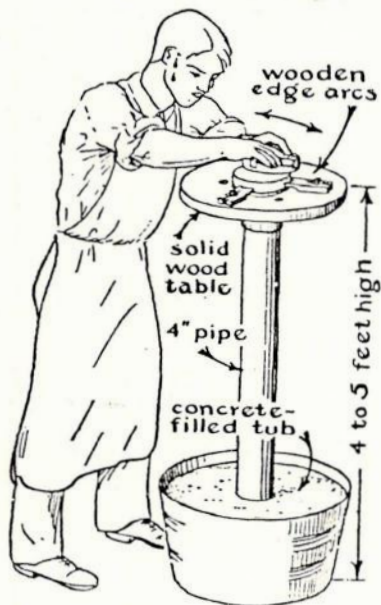


Fig. 2



As the operator strokes the work he slowly rotates the part in his hand as he walks slowly around the stand.

Fig. 3 A Many workers will prefer to have the work at a lower level, 3 to 4 feet, than is shown here. Note: The operator shown in this figure is left-handed.

DESENVOLVIMENTO

I- POLIMENTO

1. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O TRABALHO EM VIDRO E TEORIAS DE POLIMENTO: Para o leigo é sempre motivo de surpresa saber que as superfícies ópticas mais precisas que o homem consegue obter são feitas manualmente, sem ajuda de nenhum aparato mecânico e mediante procedimentos aparentemente infantis. Somos vítimas de nosso "bom senso", lentamente formado, que nos leva a admirar belas e complicadas máquinas e, é necessário um verdadeiro esforço, para ter uma visão sensata da questão. O trabalho de superfícies de alta precisão é conhecido há muito tempo e inconscientemente aplicado desde a idade da pedra: o procedimento de ajuste por frontamento e a lei do grandes números. A justar por frontamento uma superfície é frontá-la com outra de dimensão semelhante que toma o nome de ferramenta, com a interposição de um abrasivo, ou melhor, um pó composto de pequenos grãos cortantes mais duros que o material a trabalhar (vidro). A combinação do movimento de translação e da pressão que se deve exercer sobre a peça, pressão repartida sobre as duras e agudas arestas dos grãos de abrasivos (figura 1), provoca numa substância menos resistente como o vidro um grande número de fraturas e de pequenos fragmentos.

Se a lei do movimento relativo das peças é a de um regime de pressões iguais, obter-se-á automaticamente a nivelação das superfícies. Esta nivelação será menor que o diâmetro do grão interposto. Se estes movimentos estão dirigidos em todo sentido das superfícies estas terão necessariamente a forma esférica (planas em caso particular). Porém, uma pequena desigualdade de pressão ou então, efetuar mais carreiras (movimento de vai-vem) em determinado ponto do espelho (produto final desejado), não deixaria de criar uma sensível deformação; para evitá-las, é necessário aproveitar a lei das médias. Como o trabalho exige um total de várias centenas de milhares de carreiras, se concebe que o movimento produzirá uma assombrosa compensação dos erros individuais; a tal ponto que possam ser considerados irrelevantes.

Quando se talha um grande espelho de mais de 0,5 metro, o manejo da ferramenta pode superar a força de um homem ou de vários; que obriga, neste caso, a utilização de uma máquina que reproduza estes movimentos (no caso máquina de Draper). O problema consiste em fazer variar a rotina desta máquina, terminando-se por um trabalho manual.

- 1.2. FIGURADO: Partindo de um tosco disco de vidro cujas faces são aproximadamente planas se escava uma delas frontando-a sobre a superfície de outro disco de mesmo diâmetro, interpondo um abrasivo muito duro e de granulação grande (carborundo de 1/10 milímetro;) e efetuando carreiras muito anormais (centros do espelho e da ferramenta não coincidem) que tenham por efeito localizar a pressão quase unicamente no centro do disco-espelho, que adquire rapidamente, a grosso modo, a cavidade desejada.
- 1.3. ALISADO: Tem como dupla função melhorar a forma geral precedente e diminuir o mais possível a importância dos acidentes elementares de modo a possibilitar o polimento. Agora se empregam abrasivos de granulação decrescente, em que os grãos mais finos não ultrapassam a alguns microns de diâmetro e carreiras normais (centros do espelho e da ferramenta coincidem) tendem a produzir uma ação uniforme sobre toda a superfície.
- 1.4. POLIMENTO: Este é com efeito uma operação muito diferente das anteriores. É difícil ter uma idéia clara do que sucede durante esta fase. Os mais célebres talhadores ópticos, Newton e Herschel acreditavam que o polimento era uma espécie de frontamento fino cujos acidentes seriam tão pequenos a ponto de não serem detectados. Thompson, continuando com esta idéia, descreve a ação do polidor (definição está adiante) guarnecido de partículas de rouge (óxido de ferro) como ajustamento automático a um nível comum no curso da compressão e do trabalho (movimentos) e produzindo uma rede de raias ultramicroscópicas. B. Lyot, que considerou a questão do polimento com um rigor particular para as lentes de seu co

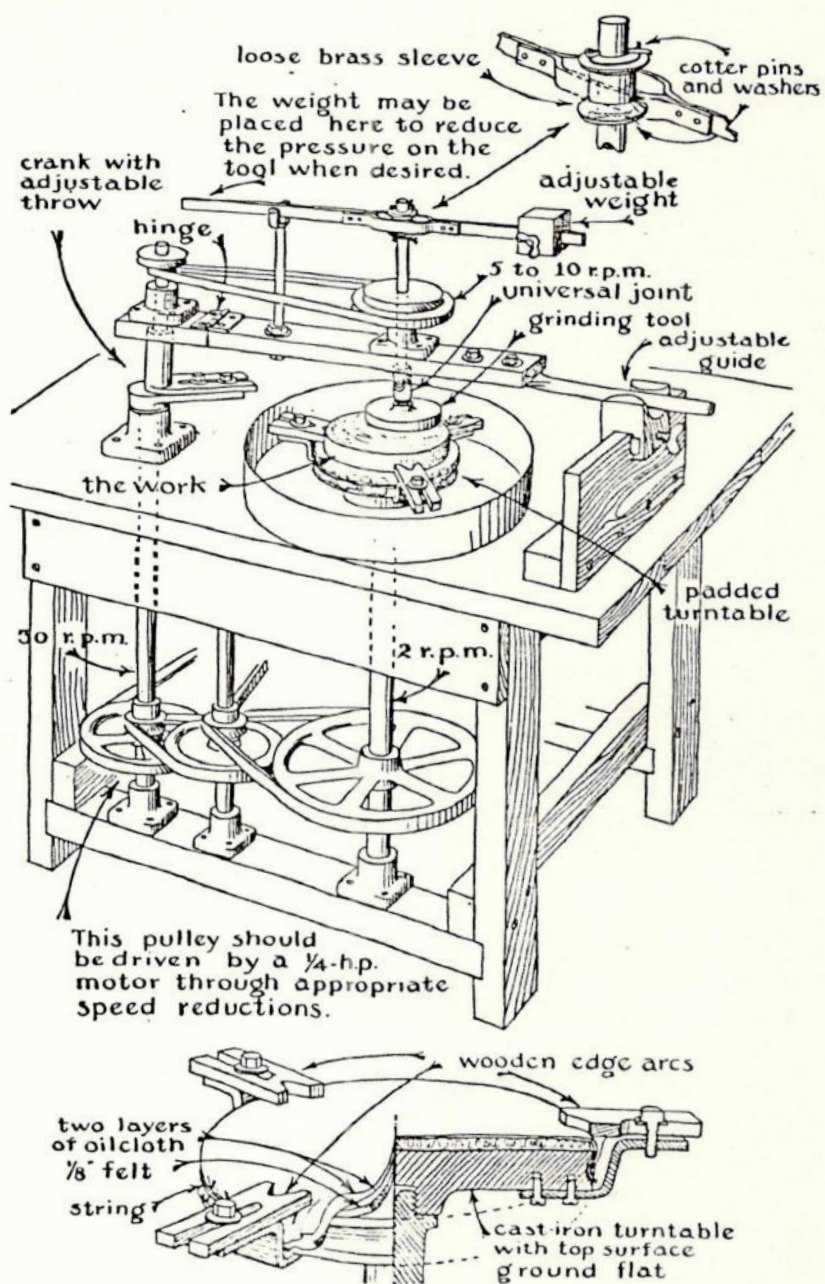


Fig. 3 B Note that the universal joint shown here is used only for rough grinding. For fine grinding and polishing, the tool is connected to the crossarm by a pivot and socket arrangement. See Figs. 16 to 20.

ronógrafo, declarou haver observado, efetivamente, ao projetar a imagem de um arco elétrico potente sobre uma superfície, inúmeras pequenas raias cruzadas em todo sentido não obstante estar polida com um cuidado particular. No polimento, o vidro é desbastado em escala molecular pela fusão através do atrito com o rouge (a temperatura de uma carreira atinge a 2000° C); este processo é totalmente diferente da ação do abrasivo que desbasta sempre em escala muito maior.

É evidente que, não obstante a simplicidade dos meios empregados, uma explicação realmente satisfatória do que sucede implicaria em grandes dificuldades.

1.5. MATERIAL EMPREGADO

1.5.1. VIDROS: Dois discos de vidro do mesmo material e mesmo diâmetro. Um será o espelho, o outro a ferramenta. É necessário aumentar em um centímetro a abertura óptica que se deseja porque tem que se levar em conta o inevitável bisel e os defeitos ópticos de borda. A espessura do vidro (espelho) é importante, deve ser pelo menos 1/8 do diâmetro para evitar problemas de flexão óptica; a ferramenta poderá ser um pouco menos espessa.

1.5.2. ABRASIVOS

1.5.2.1. CARBORUDUM: Também é conhecido como carbureto de silício (SiC) é utilizado no figurado e no princípio do alisado.

1.5.2.2. ESMERIL: Também é conhecido como alumina ($Al_2 O_3$), é usado no final do alisado.

A granulação de um abrasivo é determinada pelo tempo em que ele percorre um metro de água num tanque. O abrasivo usado em figuração (o maior) leva um minuto para percorrer um metro de água, os do alisado levam 2, 5, 10, 20, 40 e 60 minutos.

1.5.3. ROUGE: É usado no polimento, pode ser o óxido de ferro que dá resultados muito bons ou óxido de cério ou óxido de titânio, estes com resultados não tão satisfatórios.

1.5.4. POLIDOR: Pode-se usar piche 60º filtrado ou então a seguinte receita mais elaborada:

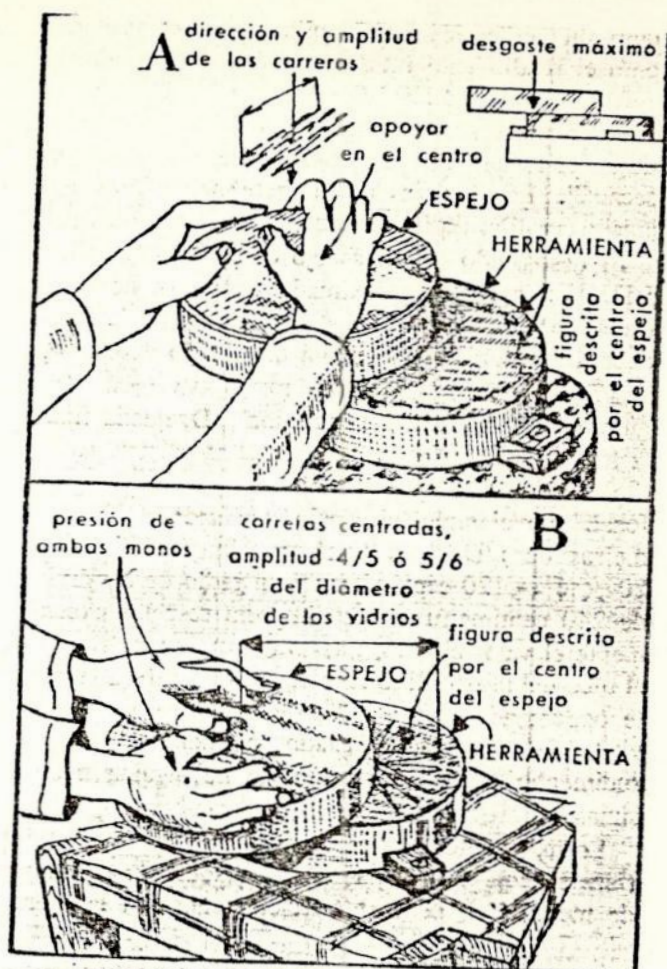


Fig. 4 Carreras del desbastado.

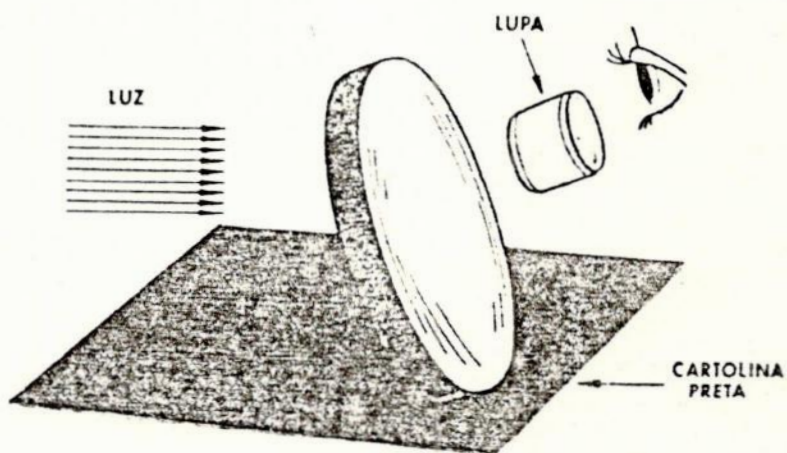


Fig. 5

Los vidrios desbastados en una posición muy excéntrica adquieren una forma notablemente apartada de la esfera y no pueden apoyar totalmente en todas las posiciones.

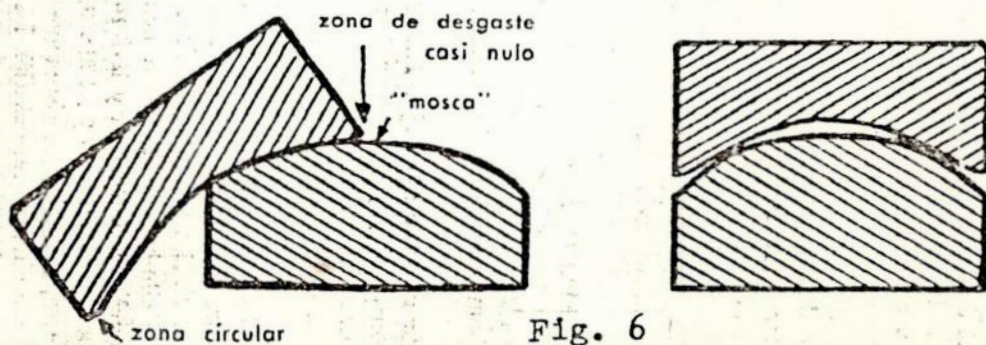


Fig. 6

Alcatrão de hulha (ponto de fusão 70 a 75°C)	0,9 Kg
Alcatrão de pinho	120 g
Cêra de abelhas	45 g
Terebentina	2 a 3 cm ³

Funde-se o Alcatrão de hulha e os outros ingredientes vão sendo agregados na ordem acima, filtrando-se posteriormente. As quantidades acima são para uma superfície de uns 20 cm de diâmetro.

1.5.5. BANCADA: Pode-se usar um tambor de óleo de 180 l em que se fixará na parte superior quatro tacos calantes dispostos a 90° para se acomodar a ferramenta (figura 3A).

2. SUPERFÍCIES CURVAS

2.1. FIGURAÇÃO. Primeiro precisamos nos certificar de que a ferramenta está perfeitamente colocada sobre a bancada (pode-se deixar um milímetro de jogo para poder girar ou levantar a ferramenta sem dificuldade), espalhamos sobre a superfície da ferramenta um ou dois cm³ de carborudum 120 (1 min) depois algumas gotas de água são salpicadas sobre o carborudum, colocamos, agora, o espelho sobre o carborudum e iniciamos os movimentos.

2.1.1. MOVIMENTOS: Na figuração, o movimento possui excentricidade (distância entre os centros dos dois discos) de $\frac{1}{3}$ do diâmetro (figura 4). Depois de seis carreiras desloca-se o espelho de aproximadamente 30° e o operador se desloca de um ângulo entre 30 e 40° em torno da bancada. Para tornar o movimento mais aleatório convém, ainda, que a cada renovação de abrasivo se gire a ferramenta, que se encontra semi fixa na bancada, de uns 30°. Esses movimentos irão produzir obrigatoriamente uma superfície côncava no disco que se encontra na mão do operador e convexa no disco que se encontra na bancada. Esse primeiro abrasivo só rende eficazmente se se aplica grande pressão; Pressão essa que, como já dissemos, deve ser aplicada no centro do disco que se encontra na mão do operador. Poderão ser dadas 5 ou 6 voltas aproximadamente em torno da bancada sem necessidade de renovar o abrasivo. Quando o abrasivo ficar pastoso é hora de

renová-lo. No entanto, se antes disso ele ficar seco, deve-se salpicar algumas gotas de água. Depois de uma hora de trabalho, pode-se medir o raio de curvatura com o auxílio de um esferômetro. Quando faltarem 30 ou 40 cm para se atingir o raio desejado (2 X o foco), a figuração estará encerrada, para espelhos de 20 cm de diâmetro e 1,5 metros de distância focal a figuração demora 4 a 5 horas dependendo do vidro. Se por algum motivo ao se medir o raio percebe-se que está menor que o esperado, procede-se da seguinte forma: invertem-se os discos; o disco que se encontrava na mão do operador passa a ficar fixo na bancada, e o que se encontrava na bancada passa a ser operado pelo operador, com isso o raio irá aumentar, periodicamente mede-se o raio de curvatura.

2.2. ALISADO: Antes de começarmos o alisado propriamente dito é necessário limpar cuidadosamente a bancada e os vidros pois, agora, iremos trabalhar com abrasivo mais fino e poderá haver contaminação do abrasivo anterior. Este procedimento de lavagem das peças é muito importante e deve ser feito com o maior rigor possível, pois as partículas de abrasivo são quase invisíveis.

2.2.1. MOVIMENTOS: Agora será centrado (excentricidade zero) a cap reirada não será mais retilínea mas em forma de V ou W ou mesmo ∞ com amplitude de $1/3$ do diâmetro. Procede-se com a deposição do abrasivo, carborudum ou esmeril, 300 (2 minutos) de maneira análoga a feita na figuração e tanto a ferramenta como o operador e o espelho devem ser deslocados de maneira análoga a anterior. De agora em diante até o final do trabalho, só usaremos este tipo de movimento. Não será também necessária força, no centro do espelho, para que o abrasivo seja eficaz. A renovação do abrasivo é mais demorada que no passo anterior por ser o mesmo de granulação menor. Depois de 30 minutos lava-se o espelho com água e o deixamos secar. Feito isso, com o auxílio de uma ocular ou lupa, investigamos se se eliminaram as marcas profundas do abrasivo anterior. Em caso afirmativo, pode-se passar para o passo seguinte. Em caso contrário, continuamos com o abrasivo até eliminarmos as marcas do abrasivo anterior.

Antes de se passar para o abrasivo seguinte procede-se uma cuidadosa lavagem dos discos e da bancada. Repetem-se estes passos com os abrasivos 5, 10, 20, 40 e 60 minutos, só passando para o abrasivo seguinte depois da análise da superfície com a ocular e depois de cuidadosa limpeza (geralmente meia hora de trabalho é o suficiente para que se eliminem as marcas do abrasivo anterior).

2.3. POLIMENTO: Este é o procedimento mais delicado e deve ser feito em local limpo. Utiliza-se para o polimento o piche 60° C ou a receita dada anteriormente. Este deve ser fundido e filtrado e, ainda líquido depositado sobre a ferramenta provida de um contorno de papel-cartão e, depois de seco abrir valas com auxílio de uma faca aquecida. A segunda opção é depositar o piche líquido sobre formas e depois de seco cortá-lo em quadrados. O que importa é que na ferramenta fiquem fixados vários quadrados de cerca de 20 milímetros de lado e que os espaços de um quadrado para o outro sejam de aproximadamente de 0,8 milímetros. Feito isso, comprime-se durante umas quatro horas a superfície do espelho a polir sobre os quadrados de piche. É aconselhável que se coloque uma folha de papel vegetal entre o espelho e os quadrados de piche para que o espelho não fique preso. Deve-se também colocar um peso de uns 5 Kg para acelerar e uniformizar a compressão.

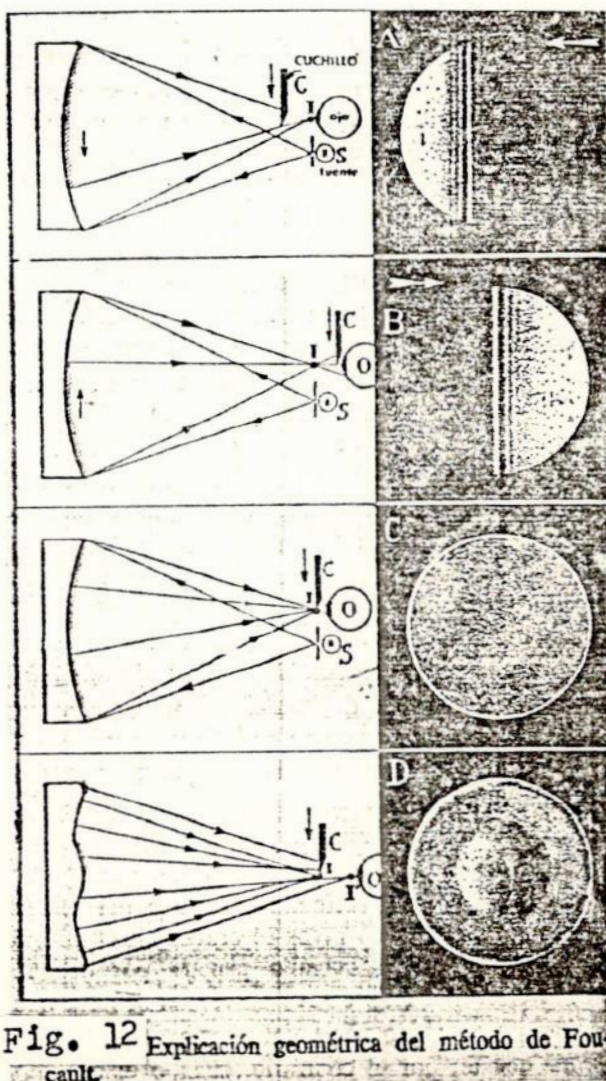
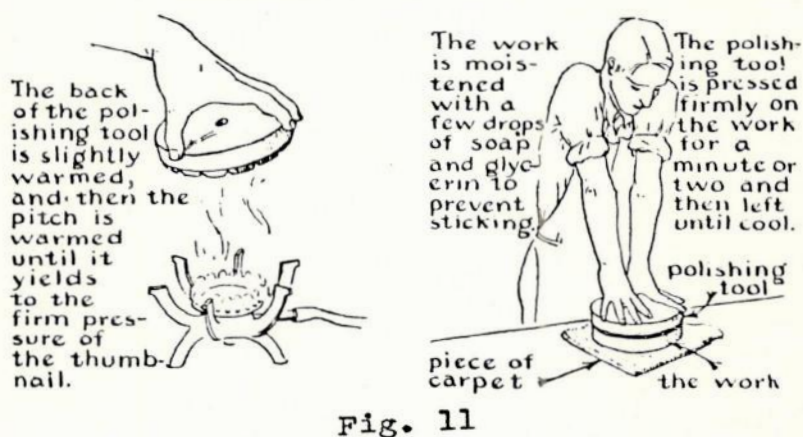
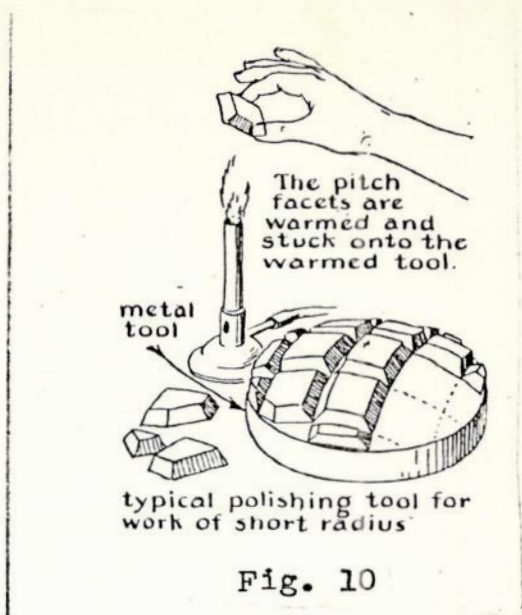
2.3.1. PROCEDIMENTOS GERAIS PARA O POLIMENTO: Indicaremos em ordem de importância, as qualidades fundamentais do local ideal para o polimento.

Asseio, evitar locais empoeirados e difíceis de limpar.

Temperatura, de cerca de 20° C, mantida constante.

2.3.2. INÍCIO DO POLIMENTO: Como no polimento o raio de curvatura varia muito pouco pode-se trabalhar tanto com o espelho em cima como em baixo, sendo, no entanto, preferível que se trabalhe com o espelho em cima. Os movimentos serão os mesmos do alisado só que agora não exerceremos força, a não ser a necessária para deslocarmos o espelho.

O rouge deve ser mantido num pequeno frasco com água (o volume de água deve ser o mesmo do rouge), deve-se agitar antes de depositá-lo sobre os quadrados de piche o que é feito com o auxílio de um pincel. Quando o rouge secar, o que ocorre em aproximadamente 5 minutos de trabalho, "pintam-se" novamente os quadrados com rouge e retorna-se aos movimentos.



interup-
ção

O processo de polimento é bastante demorado, pode chegar a 15 horas, porém, convém que se trabalhe pelo menos 2 horas sem ^{te}interrupção. Só devemos dar por terminado o processo, quando o vidro estiver perfeitamente transparente (quando ao ser projetado sobre a superfície, a imagem do Sol, com o auxílio de uma lupa, é vista com dificuldade ou mesmo não é vista).

3. TESTES CORRETIVOS: Existem vários testes corretivos: Hartmann, Lyot, Ronchi, ... porém só nos deteremos no mais importante, que é o teste de Foucault.

3.1. TESTE DE FOUCAULT. Teoria: Coloquemos o espelho sobre um suporte de tal modo que seu eixo óptico fique horizontal e coloquemos na proximidade do centro de curvatura, uma "estrela artificial" S, ou seja, uma fonte de luz cuja dimensão transversal seja muito pequena. O espelho polido, mas não espelhado, reflete bastante luz para dar uma imagem I de S suficiente para realizar o controle. Se a fonte coincidir exatamente com o centro de curvatura, a imagem de retorno se confundiria com ela e seria inacessível, devemos então, colocar a fonte ligeiramente deslocada do centro de curvatura. Coloquemos o olho imediatamente atrás da imagem I, de modo que a superfície do espelho fique total e uniformemente iluminada. Agora, devemos interceptar em I, uma lâmina opaca que chamaremos de faca. Estabeleceremos como convenção geral que a fonte fique à esquerda e a faca à direita. Suponhamos, antes de tudo, que estamos examinando um espelho perfeitamente esférico, posto que a fonte está próximo ao centro de curvatura, todos os raios se cruzam no ponto I. Quando a faca penetra adiante da ^pintercepção (figura 12A) se vê uma sombra que avança sobre a superfície do espelho no mesmo sentido que a faca. Por outro lado, quando a faca está atrás (figura 12B) a sombra se forma em sentido inverso. Se, no entanto, a faca corta exatamente a ^pintercepção I (figura 12C), devido ao fato de que todos os pontos da superfície do espelho contribuem igualmente para a formação da imagem, ver-se-á se obscurecer progressiva e uniformemente. Porém, com frequência, o espelho não é perfeitamente esférico. Observamos, antes de tudo, que os defeitos são quase sempre simétricos em relação ao eixo (é extrema-

mente raro não o serem), na figura 12D, temos um focograma de um espelho defeituoso em que a faca está cortando o foco proveniente da coroa externa. Como a fonte é proveniente da esquerda o foco está atrás da faca, correspondendo, portanto, a uma elevação central. Para facilitar a visão dos defeitos, temos o seguinte método: Imagine uma superfície plana; coloque, agora, uma fonte rasante na superfície, se esta for perfeitamente plana refletirá uma luz difusa. No entanto, se a superfície tiver defeitos haverá sombras. Então, o operador deve imaginar esta fonte na mesma posição que a fonte do aparelho de Foucault (esquerda no caso). Em nossos focogramas os defeitos estão evidentemente exagerados, pois não é possível distinguir qualquer defeito sem a utilização destes testes.

3.2. ALGUNS DETALHES SOBRE A CONSTRUÇÃO DO APARELHO DE FOUCAULT.

A faca deve se deslocar longitudinalmente e perpendicularmente ao feixe óptico; sendo que o deslocamento longitudinal deve ser medido com um parafuso micrométrico para a posterior parabolização.

A luz da fonte deve ser colimada de maneira que a imagem seja projetada sobre a fenda. Se se testa uma lente é necessário que a fonte seja monocromática.

A distância da fenda à faca deve ser menor que 40 milímetros para minimizar o astigmatismo.

A abertura da fenda deve ser variável; ela pode ficar aberta para os ajustes, mas no decorrer da observação da imagem ela deve ficar com uma abertura de aproximadamente 50 micra.

Podemos esperar a detecção de defeitos em superfícies superiores a $\lambda/20$ onde λ é da fonte, fato que depende das variáveis:

raio de curvatura do espelho

abertura da fenda

fonte (λ e colimação)

a agudez da faca

distância da fenda a faca

3.3. DEFEITOS ZONAIS: uma vez identificados os defeitos, iremos fornecer dados para sua correção com a finalidade de obtermos o esférico (figuras 23, 24, 25)

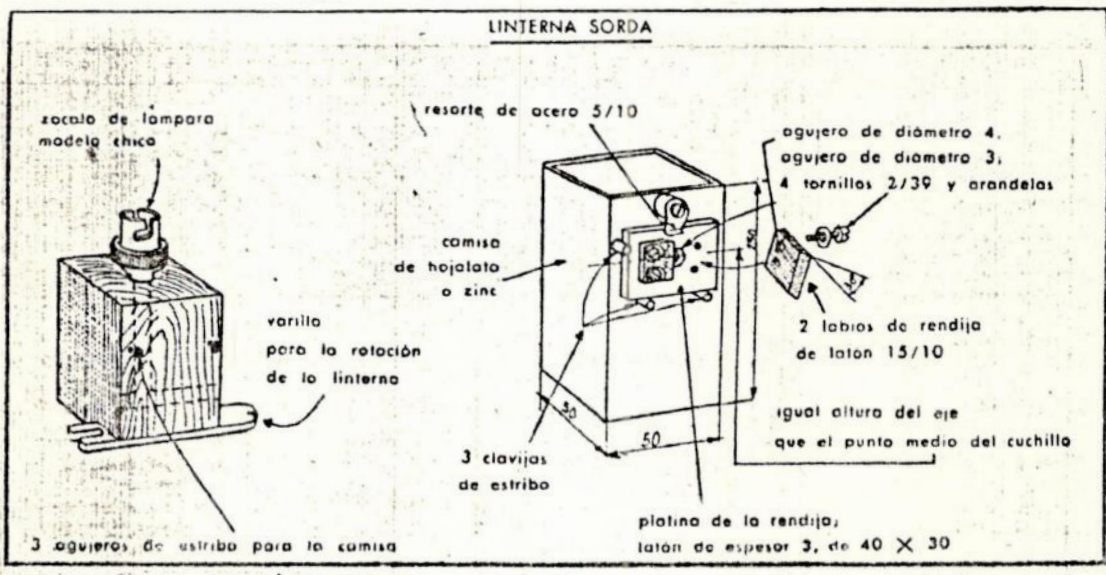
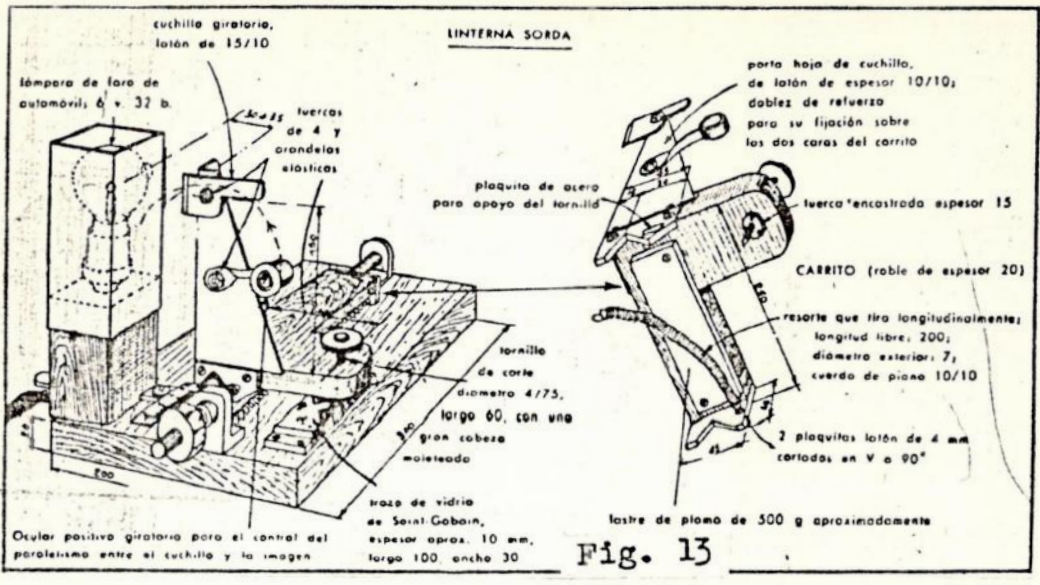
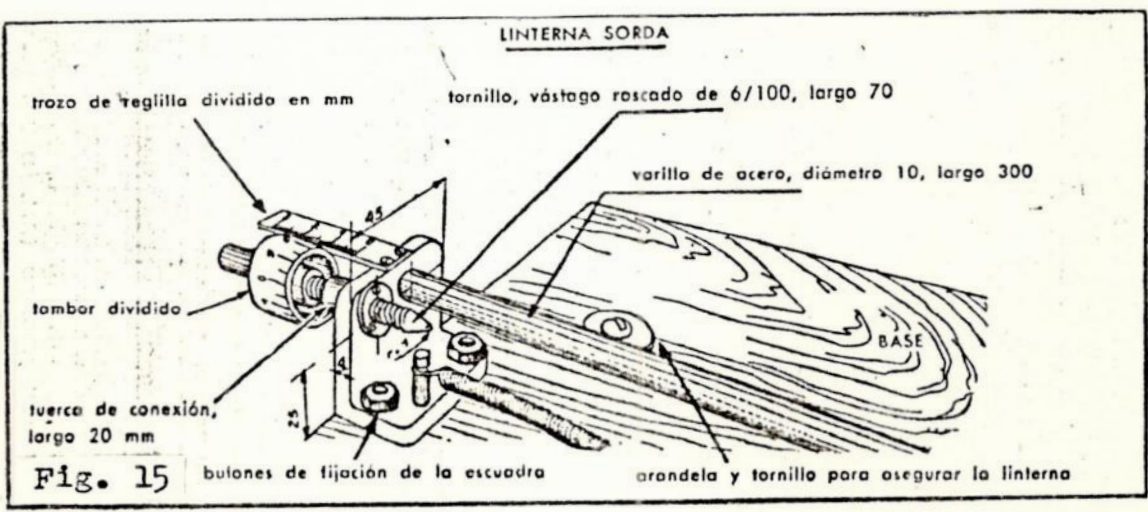


Fig. 14 Detalles de construcción de un aparato de Foucault.



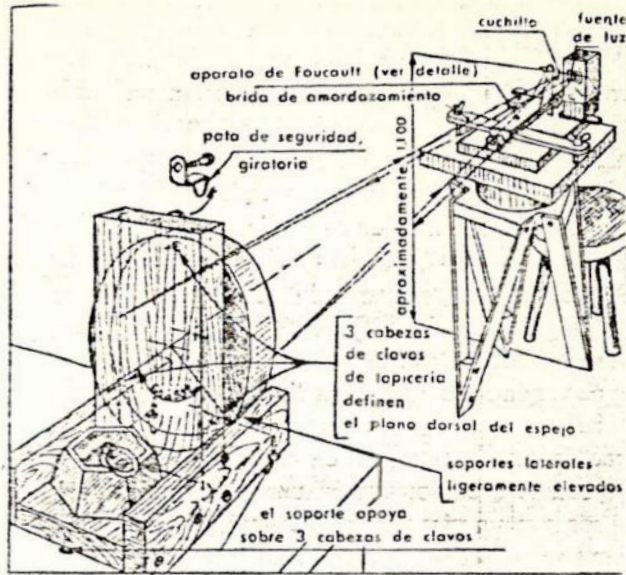


Fig. 16 Disposición general para el control de un espejo.

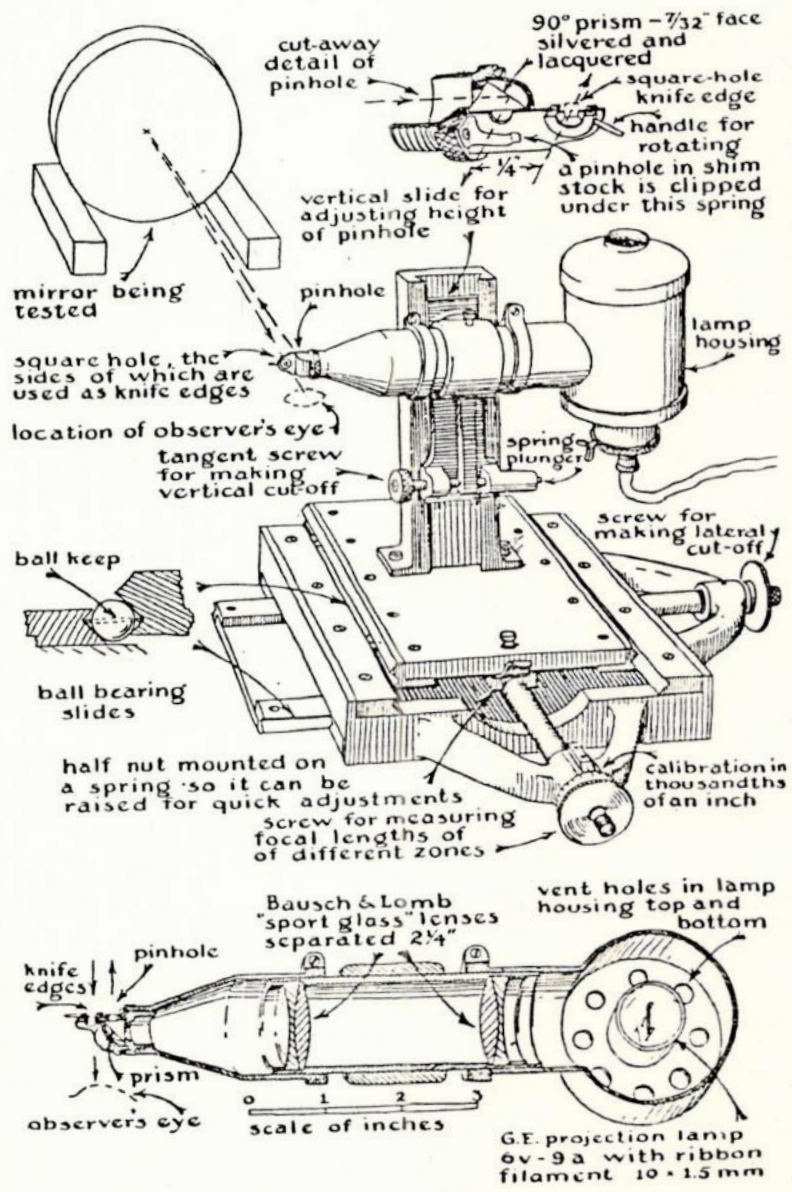


Fig. 17

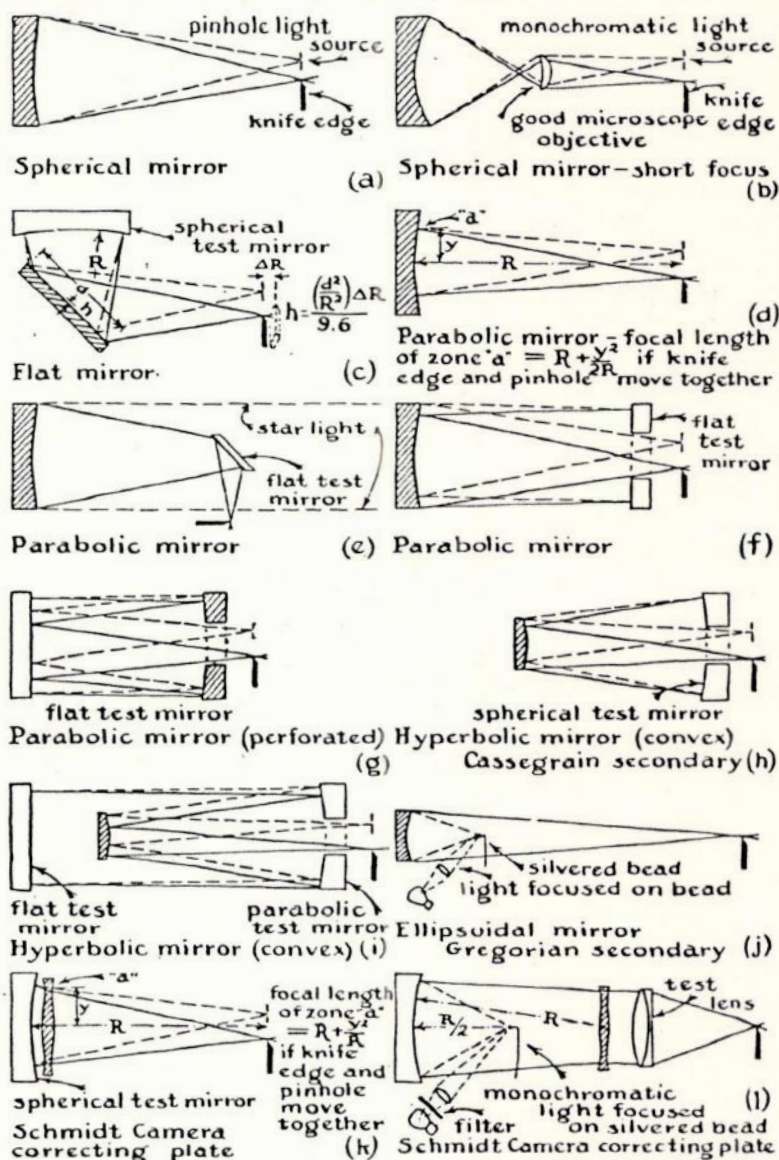


Fig. 18 Arrangements for carrying out the Foucault test:

- (a) Testing of a spherical mirror at the center of curvature.
- (b) Testing of a short-focus spherical mirror.
- (c) Testing a flat with an auxiliary spherical mirror. If knife edge and pinhole move together, a lack of flatness represented by a sagittal distance h introduces astigmatism between the horizontal and vertical focus. The relation between h and ΔR is given.

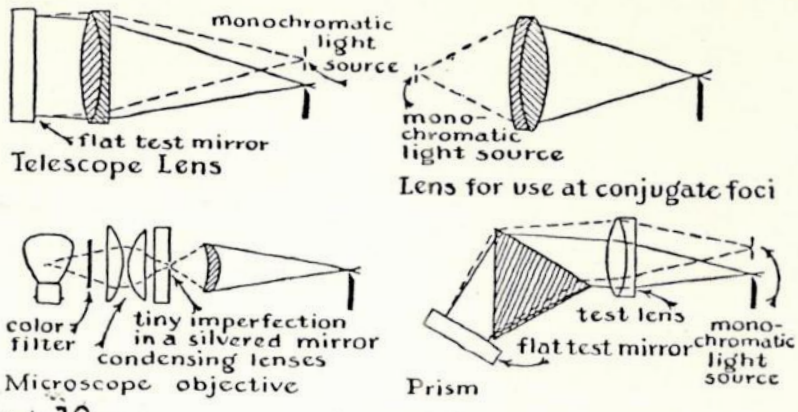


Fig. 19 Foucault tests for achromats to be used to focus parallel light and diverging light. Also, tests for a microscope objective and a prism.

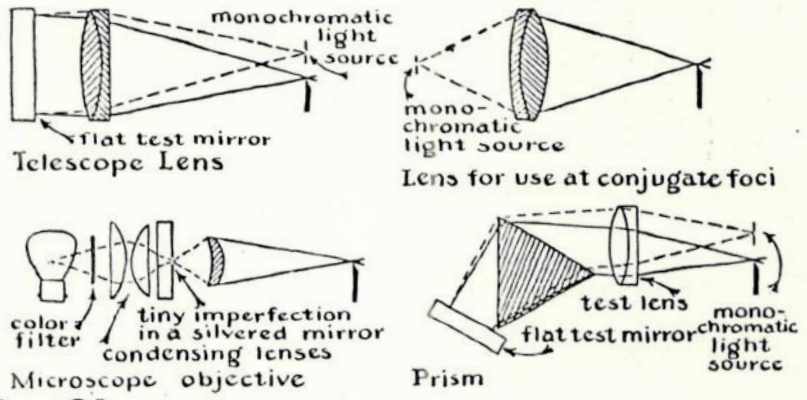


Fig. 20 Foucault tests for achromats to be used to focus parallel light and diverging light. Also, tests for a microscope objective and a prism.

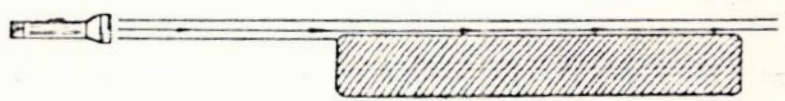


Fig. 21

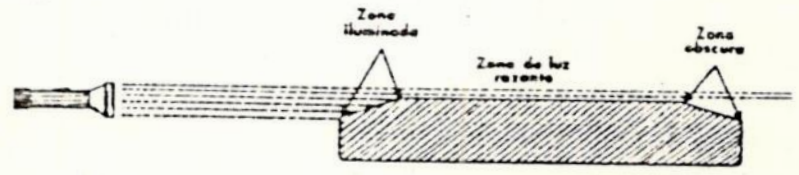


Fig. 22

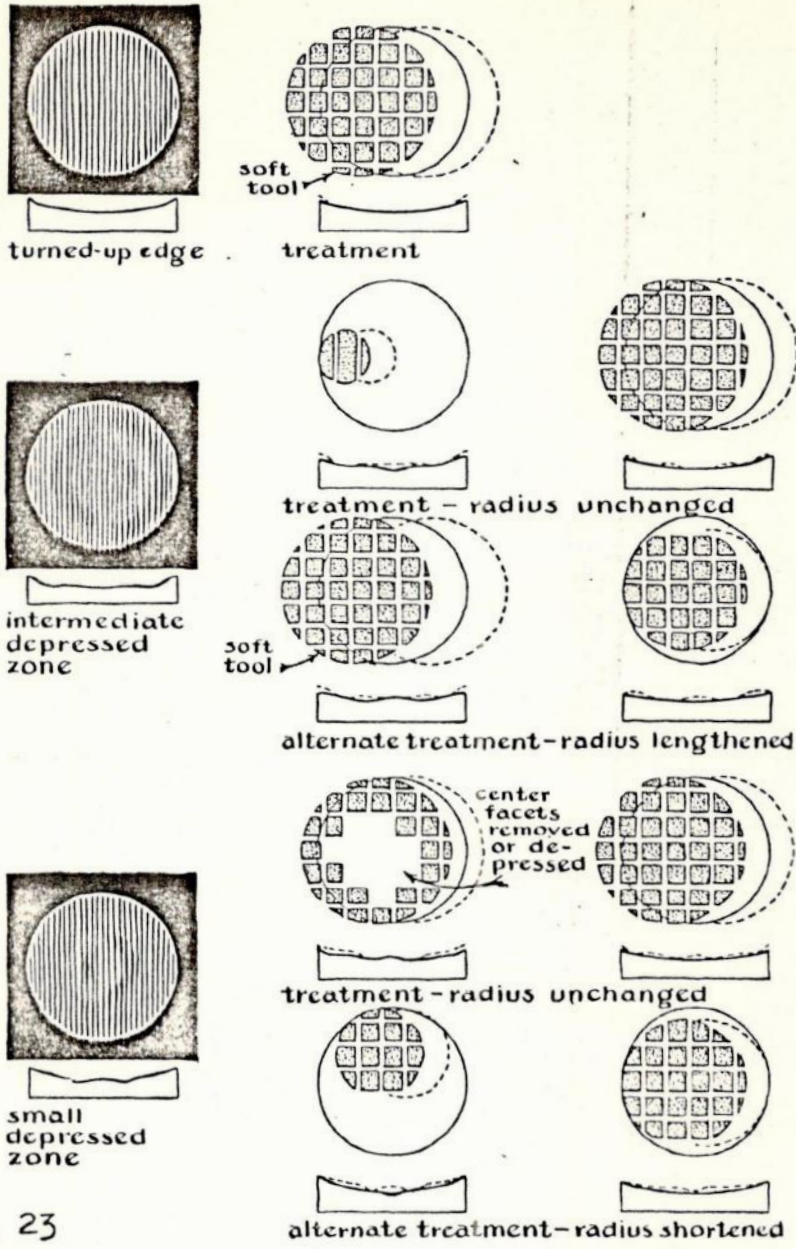


Fig. 23

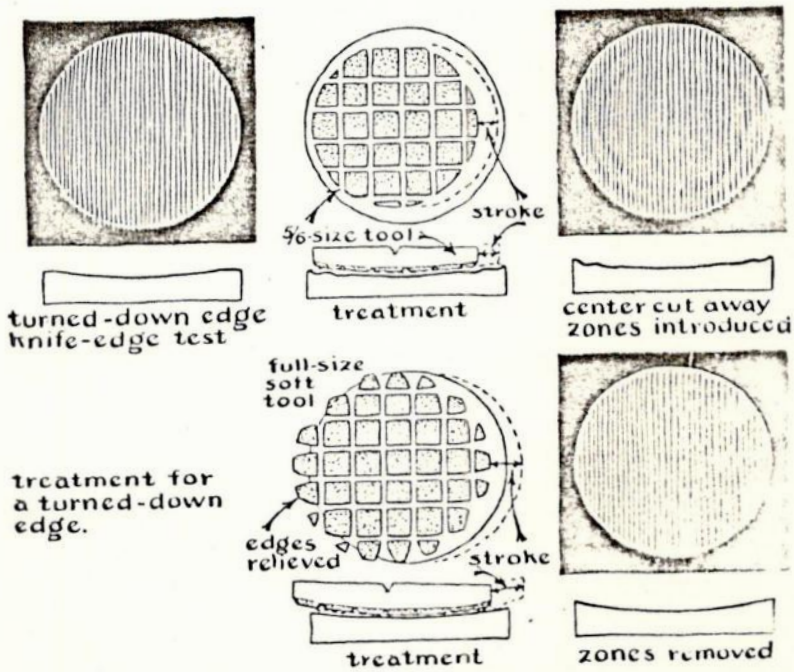


Fig. 24

4. PARABOLIZAÇÃO

Quando a distância focal da objetiva côncava é longa (maior que $f/8$) há quase coincidência do esferóide com o parabolóide a menos de: $r^4/8 R^3$ em que r é o raio do espelho e R o raio de curvatura, veja figura. Se esse valor for inferior a $\lambda/2$ a observação não será afetada. Porém se a distância focal for curta teremos que efetuar a parabolização, sendo necessário, para isso, utilizarmos o dispositivo de Foucault com parafuso micrométrico.

4.1. ESFERAS DE REFERÊNCIA. Um parabolóide pode ser imaginado como uma superfície que "tangencia" três ou mais esferas de raios apropriados, veja figura 26

A distância entre o centro de curvatura da esfera central e o centro de curvatura de qualquer outra esfera é denominada aberração longitudinal e é dada por r^2/R , onde r é o raio da zona considerada e R o raio de curvatura da esfera central (2X a distância focal).

Se fizermos r ser o raio do espelho, teremos a posição da face do aparelho de Foucault para o centro de curvatura da esfera mais externa, em relação a mais interna. A posição da face para a esfera do meio será exatamente metade da aberração longitudinal, ou seja, entre a e b. Retornemos agora a fórmula r^2/R para saber o raio da zona do meio.

Agora, fazemos um diagrama de papel cartão, recortamos as zonas e colocamos sobre a superfície do espelho; procede-se com o teste de Foucault. Para se chegar ao parabolóide através do polimento, pode-se trabalhar as três zonas em separado ou em conjunto dependendo da correção. Veja figuras 29, 30.

Exemplo: Vamos parabolizar um espelho que tenha 20 cm de diâmetro e 160 cm de distância focal.

a aberração longitudinal será $r^2/R = \frac{10\ 000}{3\ 200} = 3,12$ mm

se colocarmos a origem no centro da esfera mais interna (a) o centro da esfera mais externa (b) deverá ter como leitura no aparelho de Foucault 3.12 mm.

o raio da esfera do meio (c) deverá ter como valor 1,56 mm

A zona do meio deverá ter como ^{DIÂMETRO} raio médio o valor de 14,14 cm.

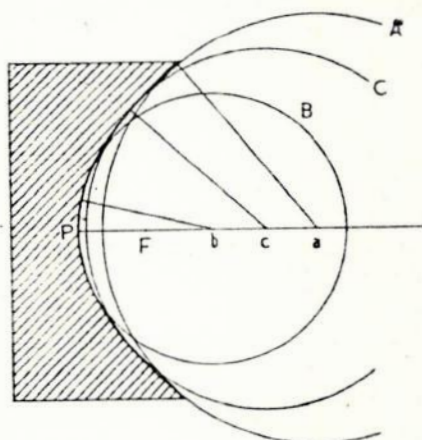
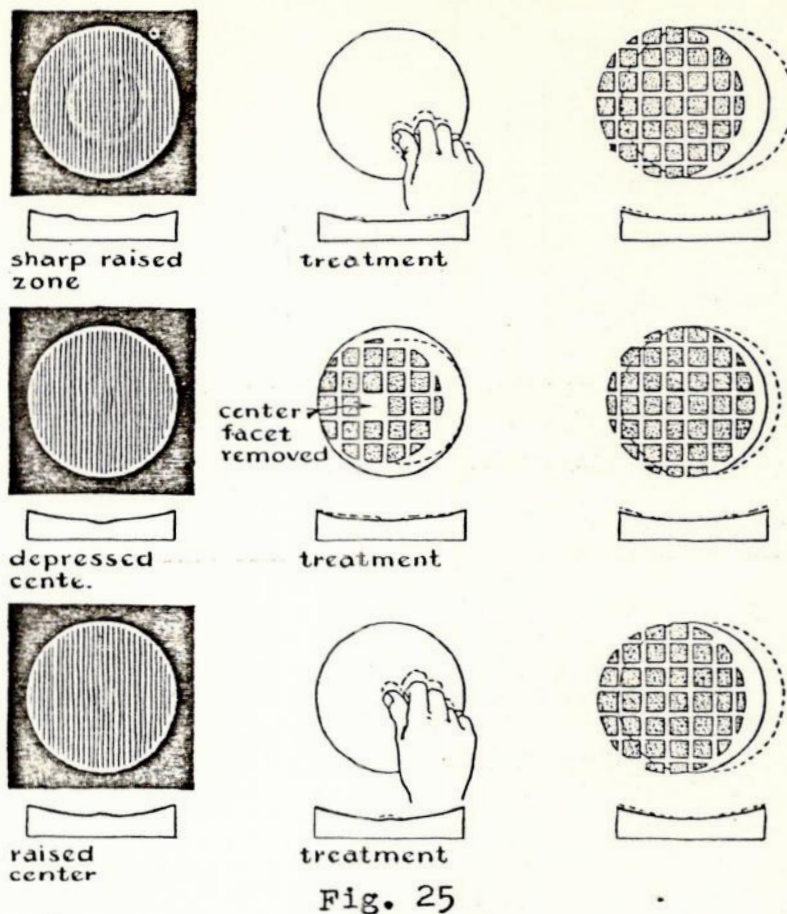
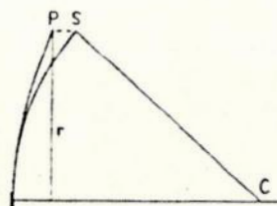


Fig. 26 The three reference spheres used in testing a paraboloid.

Fig. 27 Illustrating the relationship between a paraboloid, P, and the reference sphere, S, used in testing, when the knife-edge is placed at the center of curvature, C, of the mirror's central zone. On the scale of the drawing, the 6-inch $f/8$ is shown by the short heavy line.



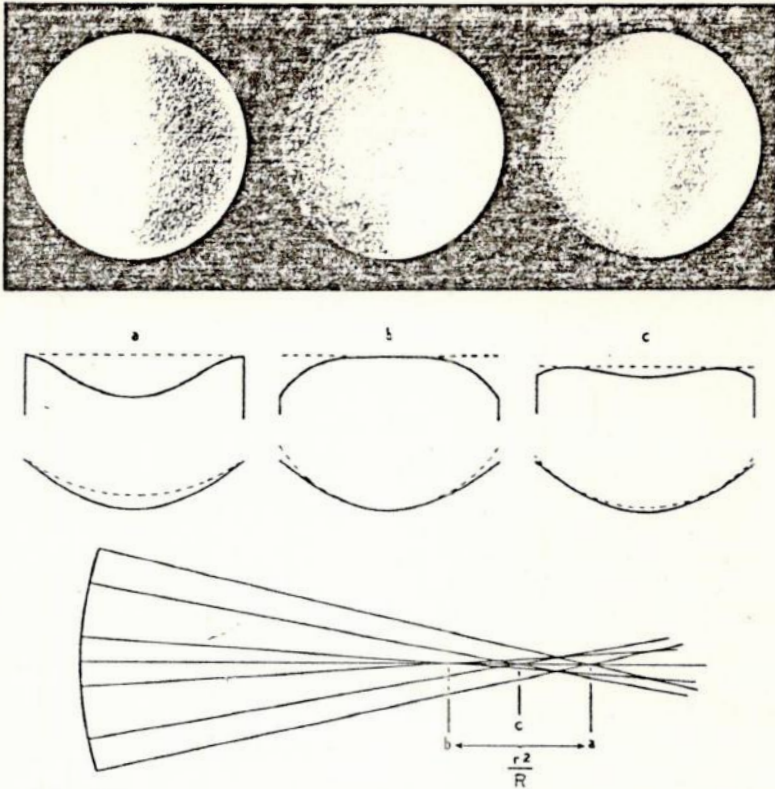
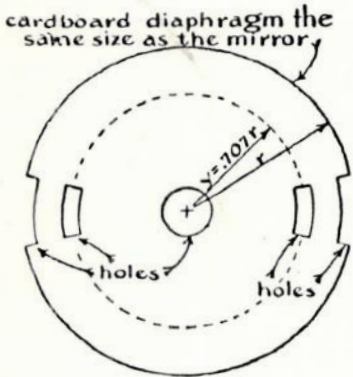


Fig. 28 Shadows seen on the paraboloid when the knife-edge is at the center of curvature of: (a) edge zone; (b) center zone; (c) 70-per-cent zone. Why the shadows behave as described in the text can be found from a study of how, in the lower diagram, the rays proceeding from the various zones of the mirror are intercepted by the knife-edge. Beneath the shadowgrams are shown the apparent cross sections of the mirror seen at the respective knife-edge settings, the broken straight lines representing the reference spheres used in testing, and also the relationship of these spheres with the concave paraboloidal mirror.



Typical zonal diaphragm of a parabolic mirror
 For this diaphragm, if the focal length of the center is R , the focal length of the intermediate zone should be $R + \frac{r^2}{4R}$, and the focal length of the rim should be $R + \frac{r^2}{2R}$. Example — for a 6-inch mirror, $f = 4$ feet, the focus at the center will be 96 inches, at the intermediate zone $96 + 0.023$, and at the rim $96 + 0.047$. The dimension R (96) need not be precisely measured.

Fig. 29

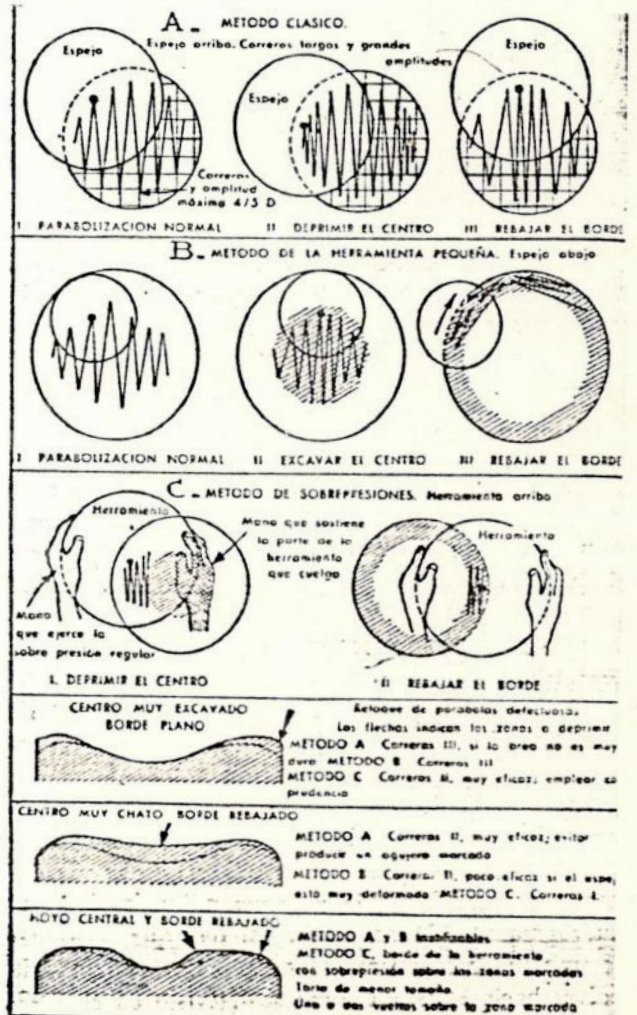


Fig. 30 Métodos de parabolización.

5. SUPERFÍCIES PLANAS

- 5.1. ALISADO. Como os discos de vidro já são aproximadamente planos não haverá necessidade de usar abrasivos muito granulados, podemos começar do "30 minutos". Outro fato a considerar, quando se pole superfícies planas, é que devemos alterar a posição do espelho e da ferramenta (a cada duas voltas na bancada) isso para evitar a esfericidade das peças.
- 5.2. MOVIMENTOS. Os movimentos são os mesmos do alisado das superfícies esféricas. Depois de 1 hora observa-se com uma lupa se a superfície esta homogênea, em caso afirmativo pode-se passar para o abrasivo seguinte. Procede-se assim até o abrasivo 2000, não esquecendo de a cada 2 voltas inverter os discos.
- 5.3. POLIMENTO. O polidor é diferente do visto em superfícies esféricas, a ferramenta deve ser pelo menos 10% maior que o espelho, e ao invés dos quadrados haverá uma "vala" diametral, feita depois que o piche estiver seco, procede-se uma compressão antes de começar o polimento propriamente dito. Deposita-se o rouge e procede-se com amplitude não superior a $1/4$ do diâmetro, invertendo-se aqui também a posição dos discos.
- 5.4. TESTE DE FIZEAU. A análise de superfícies planas é feita com o teste de Fizeau, que se baseia na observação dos anéis de Newton. Para seu estudo necessitamos de um dispositivo bastante simples (figura 32): uma fonte monocromática (por exemplo: lâmpada de neon, lamparina de álcool saturada com sal, lâmpada fluorescente, etc.) e uma placa de vidro com faces perfeitamente planas e maior que a peça.
- 5.5. CONTRÔLE DE SUPERFÍCIES PLANAS. Em primeiro lugar deve-se limpar a placa de vidro e a peça a testar; coloca-se agora a placa sobre a superfície e observamos as franjas no dispositivo da figura 32. Em princípio, haverá um número muito grande de franjas, o que torna a análise muito difícil, deve-se colocar então um calço entre a placa e a superfície (pode-se usar um pequeno pedaço de folha de papel dobrada, se necessário, várias vezes até que as franjas fiquem em pequeno número).

Fig. 31

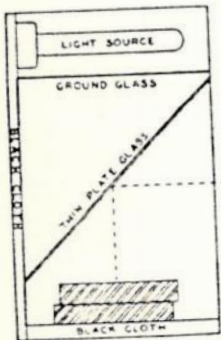
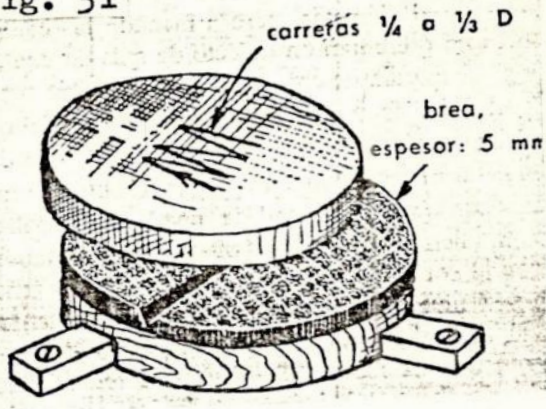


Fig. 32 Using a "beam-splitter" for observing interference bands. By this method, both eye and light source are brought normal to the surfaces under test.

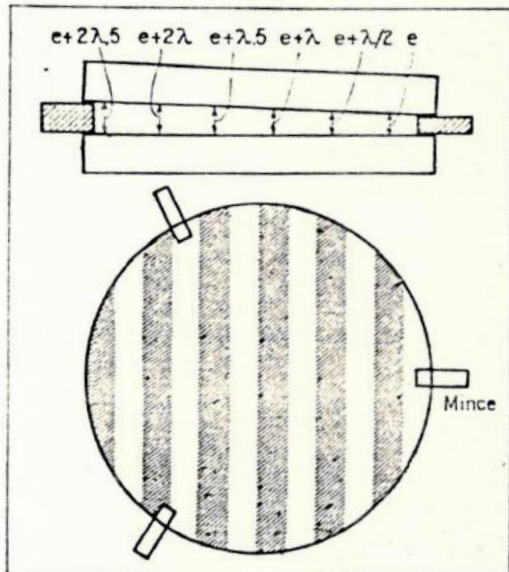


Fig. 33 Création des franges d'interférence.

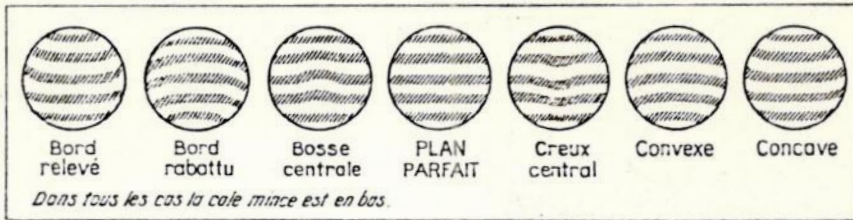


Fig. 34 - Quelques aspects de miroirs plans. Principaux défauts.

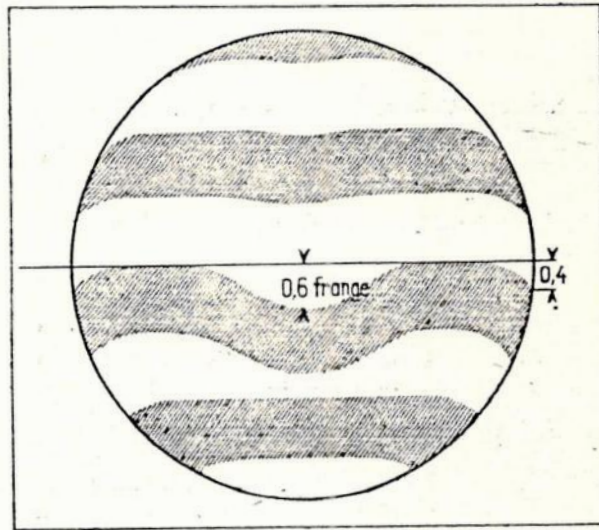
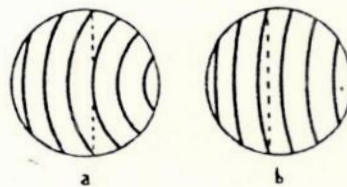


Fig. 35 - Mesure des défauts sur un miroir plan. Ici, un creux central de 0,6 frange soit $\lambda/3,3$ et un bord rabattu de 0,4 frange soit $\lambda/5$.

Fig. 36 Use of a straightedge in testing for flatness. At a, departure from flatness of half a wave is indicated; at b, the difference amounts to less than a quarter of a wave. Dividers should be used for precise measurement.



Se a superfície da peça for perfeitamente plana as franjas aparecerão retas, paralelas e uniformemente distribuídas.

Se a superfície for ligeiramente côncava as franjas aparecerão paralelas, uniformemente distribuídas, mas curvas envolvendo o calço. Se as curvas estivessem envolvendo a face oposta a calço a superfície será convexa.

Podemos ter uma idéia da precisão da superfície se estimarmos a "altura" da curva. Se a distância entre duas franjas é $\lambda/2$ então a precisão será dada por $K \cdot \lambda/2$, onde K se estima visualmente em fração da distância desta até a franja imediatamente interna. Veja figuras 35, 36

Se a superfície apresentar franjas irregulares ou se a curvatura for muito acentuada deve-se retornar ao polidor com os movimentos já descritos.

II- ESPELHAMENTO

1. INTRODUÇÃO: O prateado químico e o aluminizado por evaporação a vácuo são os dois processos mais empregados atualmente para metalizar espelhos.

As grandes vantagens do prateamento são o alto poder refletor da prata no espectro visível alcançando a 98% no infravermelho e simplicidade de execução. Como inconveniente temos desigualdades frequentes na espessura do depósito, que dependem principalmente do estado da superfície do vidro e rápida oxidação, que diminui muito rapidamente o poder refletor, especialmente no violeta e azul, requerendo polimentos a cada 15 dias e replateado duas vezes por ano se se quer espelhos em perfeito estado.

A aluminização por evaporação a vácuo produz capas refletoras, realmente, impecáveis. A uniformidade da espessura se obtém com a adoção de precauções elementares e com uma precisão tal, que os exames ópticos mais sensíveis não mostrem nenhuma alteração de sua forma. O poder refletor do alumínio não passa de 88%, o que não constitui uma grande desvantagem com respeito a prata, exceto no que diz respeito a radiações infravermelhas. Em caso contrário, no ultravioleta, o poder refletor do alumínio é mais elevado que a prata. A resistência dos espelhos aluminizados à oxidação é muito grande, forma-se uma capa de alumina transparente que protege o aluminizado. Estima-se que o espelho aluminizado renda bem durante uns 5 anos. A grande desvantagem é a aparelhagem mais sofisticada.

2. LIMPEZA: As películas de prata ou alumínio não se depositam bem sobre superfícies que não estejam muito bem limpas. Por isso deve-se eliminar do vidro todos os vestígios de rouge, piche e outras impurezas. Uma vez limpa, mantém-se o espelho submerso em água destilada, até o espelhamento.

O primeiro passo para limpar é eliminar todo o traço de rouge e outras substâncias de contaminação dos lados e da parte posterior (parte não óptica), o que é feito com uma exaustiva e delicada lavagem com água destilada e atritá-la com cuidado sobre a superfície. Pode ser necessário repetir várias vezes esse tratamento.

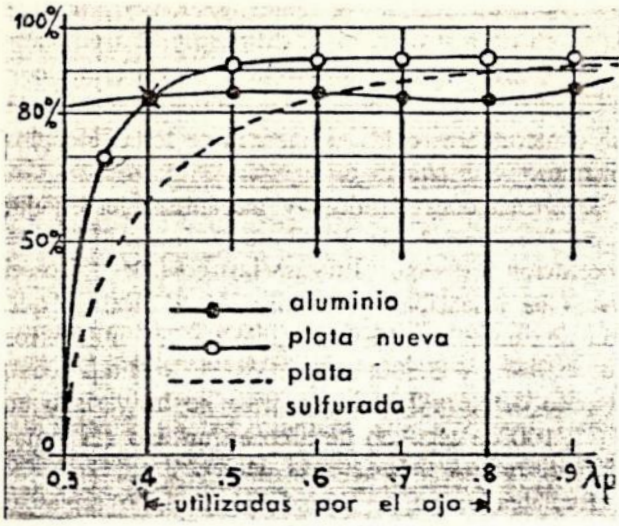


Fig. 37

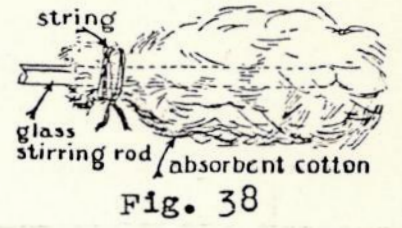


Fig. 38

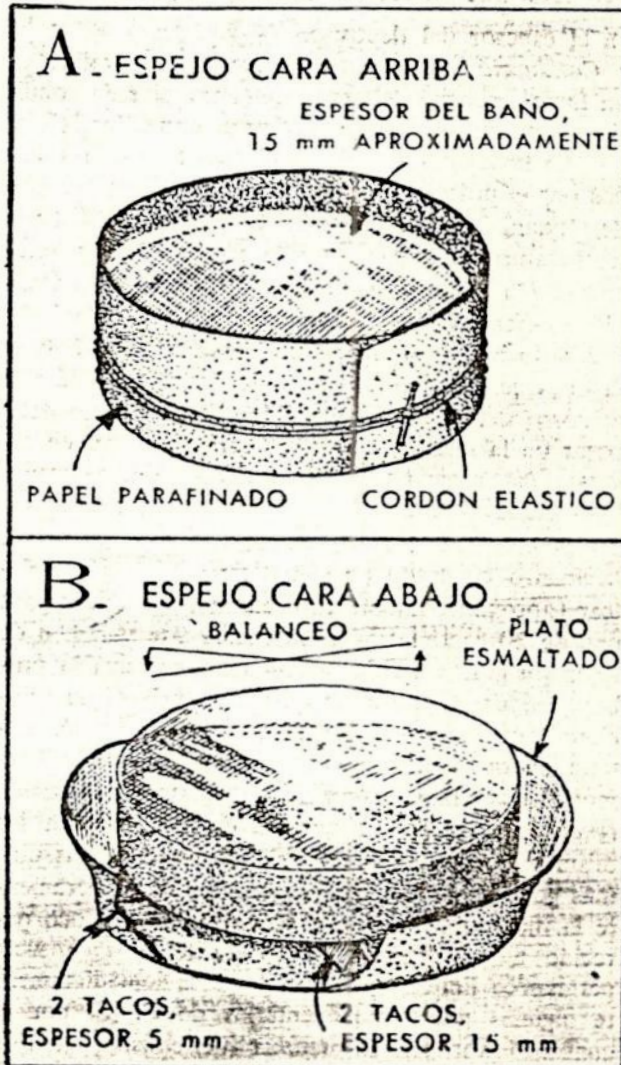


Fig. 39 Modos de platear.

contato direto?

Depois de se enxugar a água com algodão esfrega-se ácido nítrico concentrado com auxílio de uma mecha de algodão envolvida em um bastão de vidro (este ácido é muito corrosivo e deve ser operado com extremo cuidado para não entrar em contato direto).

com
quím
ou
com
que

Pode-se usar ainda uma mistura de ácido sulfúrico e ácido crômico; no entanto, isto não é necessário em geral.

Uma vez enxaguado com água corrente destilada, se trata o espelho com cloreto estanhoso. Depois de uns minutos, lava-se bem com água destilada. Este banho deve ser bem demorado para se eliminar os íons de cloro. O espelho pode ser mantido, agora, submerso em água destilada até começar o espelhamento.

Ao pratear, é importante também, limpar todos os recipientes, que irão entrar em contato com as soluções para evitar as nocivas contaminações.

3. MÉTODO DE PRATEADO QUÍMICO: Os dois métodos mais usados para prateados químicos são: métodos de Brashear e o método do Sal Rochelle. O primeiro se utiliza para o revestimento grosso em espelhos de telescópios. O método de Sal de Rochelle — devido a sua ação mais lenta — se recomenda para semi-espelhos, como as placas de interferômetros, que requerem uma delgada película uniforme com uma relação determinada entre reflexão e transmissão.

3.1. PROCESSO DE BRASHEAR: As quatro soluções a preparar são as seguintes:

- | | | |
|--------------------------------------|------------|----|
| A. Nitrato de prata cristalizado | 60
90 g | |
| Água destilada até completar 1000 cc | | |
| B. Nitrato de Amônia cristalizado | 90 g | |
| Água destilada até completar 1000 cc | | |
| C. Hidróxido de potássio | 150 g | ou |
| Hidróxido de sódio | 105 g | |
| Água até completar 1000cc | | |
| D. Açúcar branco de mesa | 30 g | |
| Ácido tartárico | 2 g | |
| Álcool de 90º | 50 ml | |
| Água até completar 1300 cc | | |

que tipo álcool,
anidro?

Esta última solução deve ser preparada da seguinte forma: Num pequeno vasilhame esmaltado e bem limpo, dissolve-se açúcar e o ácido tartárico com um pouco de água destilada; leva-se o vasilhame ao fogo lento mantendo em ebulição durante 10 ou 15 minutos, para a dissolução do açúcar; esfria-se com um pouco de água destilada, antes de acrescentar o álcool que tem papel conservador, e se completa finalmente o litro com água destilada. Esta solução redutora deve ser preparada uma semana antes de ser usada, pois melhora sensivelmente com o tempo, ao contrário das soluções B e C que devem ser preparadas pouco antes de serem usadas, com produtos recentemente extraídos da embalagem.

3.2. PROCESSO DE SAL DE ROCHELLE: Para o processo de Sal de Rochelle se necessita de duas soluções. A solução A se prepara assim: se dissolve 5 g de nitrato de prata em 300 cm³ de água e se acrescenta amoníaco, como no processo de Brashear, de maneira que o precipitado de óxido de prata formado fique quase claro. Filtra-se e dilui-se com água até 500 cm³. A solução B se prepara da seguinte maneira: se dissolve um grama de nitrato de prata em 500 cm³, se ferve e se acrescenta 0,83 g de Sal de Rochelle dissolvida em um pouco de água, continua-se fervendo até que se deposite um cristal cinzento. A solução se filtra ainda fervente e se dilui em água até 500 cm³. Esta solução se conserva durante um mês ou mais, mas protegida da luz.

Quando se quer pratear um espelho se misturam as soluções A e B e se derrama sobre o recipiente, onde se encontra a peça. A quantidade dada acima é o suficiente para uma película espessa sobre uma superfície de 200 cm². A temperatura recomendada é de 20° C.

Mediante o processo do Sal de Rochelle, a prata se deposita lentamente; se requer uma hora para formar um depósito grosso. Se se retira o vidro da solução em um momento adequado, se obtém películas semi-refletoras. O processo da deposição pode ser analisado por meio de placas de vidro auxiliares, que se retiram de quando em quando a fim de determinar o tempo do processo de revestimento da peça principal em curso.

3.3. MODO DE PRATEAR: Devemos depositar o espelho em um vasilhame bem limpo e ligeiramente maior do que o espelho. Podemos trabalhar tanto com a face polida para cima como para baixo; se trabalhamos com a face para baixo devemos colocar a superfície sobre pequenos tacos de 1,5 cm de espessura num sentido e 0,5 cm em outro, isso para oscilarmos o espelho no decorrer do banho. Em ambos os casos a altura dos banhos não deverá exceder a 20mm acima da superfície polida.

No caso do processo de Brashear juntam-se numa proveta as soluções A e B, agita-se vigorosamente com um bastão de vidro e, incorporamos a solução C -deve-se ter cuidado com esta mistura (A + B + C), pois quando exposta ao Sol forma fulminato de prata que é altamente explosivo, muito instável e de deflagração / espontânea. Deve pois ser usada instantaneamente. Derramamos / agora, a nova mistura no recipiente onde se encontra o espelho e a seguir incorporamos a solução D; deve-se ^{agitar} irregularmente o espelho ou a solução, para igualar, o melhor possível o depósito. Ao cabo de uns 3 minutos e a 20° C vê-se aparecer sobre o vidro um reflexo metálico; não se deve retirar o espelho para examiná-lo. Uma permanência cinco vezes maior é necessária para obter o depósito ideal. O precipitado pode ser considerado como terminado, assim que o banho se aclara.

Retira-se o espelho do banho, quando se está seguro de / que o banho esta encerrado. Submerge-se, agora, o espelho num recipiente de água destilada para lavá-lo; em seguida deve-se assegurar da opacidade da capa (prateados grossos permitem ver por transparência apenas o Sol ou uma potente lâmpada). Se o prateado for muito débil deve-se preparar imediatamente um segundo banho para reforçar o depósito. A secagem do espelho deve ser feita rapidamente após livrá-lo de gotículas, por ventura, existêntes.

Como achou $F = 1250 \text{ mm}$
precisão: 200 e 300 Å

CONCLUSÃO

Baseado no que foi escrito aqui, construí algumas peças com resultados muito bons, sem nenhuma dificuldade. A peça mais representativa foi um espelho esférico de 150 mm de diâmetro, 1250 mm de distância focal e com uma precisão entre 200 e 300 Å. Levando cerca de 40 horas até estar polida e corrigida.

O prateamento foi levado a cabo no Departamento de Físico-química da UFRJ. Utilizamos o método de Brashear após uma limpeza extremamente rigorosa em que utilizamos ácido nítrico e acetona. A duração do banho foi de 17 minutos. Os resultados foram excelentes.

Embora não fosse objetivo deste projeto, foi tentada a aluminação no Departamento de Física Nuclear da UFRJ com resultados insatisfatórios, pois ocorreram vazamentos na câmara, que foram resolvidos depois de muito esforço. Uma vez conseguido o vácuo de 10^{-4} tor depois de 3 horas, com auxílio de uma bomba de difusão, obtivemos finalmente a vaporização do alumínio fixado em apenas uma fonte de tungstênio. No entanto, uma análise posterior do espelho mostrou irregularidades não desprezíveis e pequenas manchas, o que nos levou a abandonar temporariamente este tipo de espelhamento. Fica assim a sua discussão para um segundo trabalho que pretendo executar.

Sendo assim, creio que os objetivos iniciais do projeto foram alcançados satisfatoriamente.

O aluno, pelo interesse demonstrado, deve ser incentivado para formar, aos poucos, o laboratório de óptico do O.V. Enquanto isso, deve ser encarregado da conservação dos materiais ópticos, tubos, etc. — já existentes!

BIBLIOGRAFIA

- optics*
- ↓ ↓
- Brown, Earle. Optical Instruments. Brooklyn: Chemical pub. co., 1945 10
- Strong, John. Procedures in Experimental Physics. New York; Prentice-Hall, inc., 1938 101
- Texereau, Jean. El telescopio del aficionado. Buenos Aires; EUDEBA, 1961 10
- Thompson. Making your own telescope. Cambridge; Sky Pub. Corp, 1967 101