



INSTRUMENTOS ÓPTICOS SIMPLES E GONIÓMETRO

1 Introdução

Pretende-se com este trabalho desenhar e montar no laboratório montagens ou sistemas ópticos compostos com duas ou mais lentes delgadas, testando as suas características principais. As duas montagens – um telescópio simples e um microscópio – são variações do esquema óptico apresentado na Secção 5 do Trabalho de Óptica Geométrica.

Nestes sistemas, designamos por *objetiva* a lente que está do lado do objeto e por *ocular* aquela que está do lado do observador, com distâncias focais f_{obj} e f_{ocu} respetivamente. Em ambos os casos, a ocular está próxima da *imagem intermédia* A'B' formada pela objetiva. Sendo a distância inferior à distância focal f_{ocu} , a imagem final será *virtual*, ou seja, visível apenas através da lente.¹ Assim, o papel da ocular consiste em ampliar a imagem intermédia, tal como um lupa amplia um objeto. Continua-se neste trabalho a usar a análise da óptica geométrica paraxial ou de 1.^a ordem.

Como segundo objetivo, pretende-se que os alunos tomem conhecimento e aprendam a manusear e a tomar medidas corretamente com um instrumento óptico de precisão, o *goniómetro*. Este instrumento permite medir ângulos de desvio, por reflexão ou refração de feixes de raios paralelos, com uma resolução inferior a um minuto de grau.

1.1 O olho humano

Para efeitos práticos, considera-se o infinito óptico qualquer distância superior a 5 m. Para o nosso estudo, a lente da córnea e a lente do cristalino são substituídas por um sistema equivalente constituído por uma única lente, com o máximo de distância focal f igual a 2,5 cm, que é a média da distância entre a córnea e a retina (Fig. 1). A potência em dioptrias (dt) desta lente equivalente é dada por:

$$D = \frac{1}{f} [\text{m}^{-1}] = \frac{1}{0,025} [\text{m}^{-1}] = 40 [\text{m}^{-1}] = 40 \text{ dt.} \quad (1)$$

Se um objecto está no infinito, os raios ópticos vindos dele chegam paralelos ao olho, e são focados na retina sem necessidade de acomodação do olho, ou seja, com o olho relaxado

¹Cf. *Guia de Óptica Geométrica*, Secção 3.5.

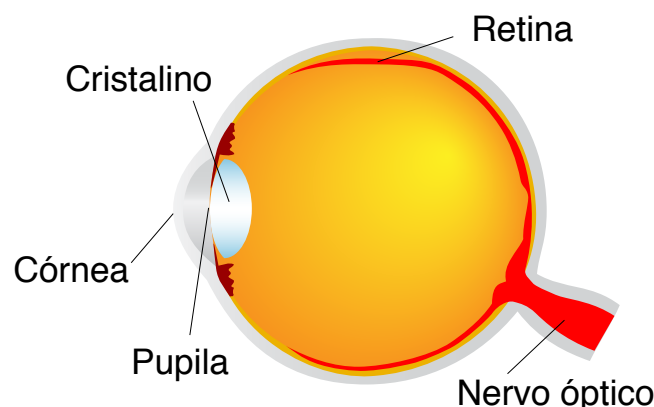


Figura 1: Diagrama dos principais elementos do olho humano.

(Fig. 2 à esq.). À medida que o objecto se aproxima do olho é necessário os músculos ciliares aumentarem a curvatura da lente para criar uma imagem focada na retina – a isto chama-se *acomodação do olho*. O ponto mais próximo do olho para o qual a lente ainda consegue focar a imagem na retina é designado por *ponto próximo* (Fig. 2 à dir.). Esta distância aumenta com a idade e considera-se o ponto próximo igual a 0,25 m para uma visão normal padrão.

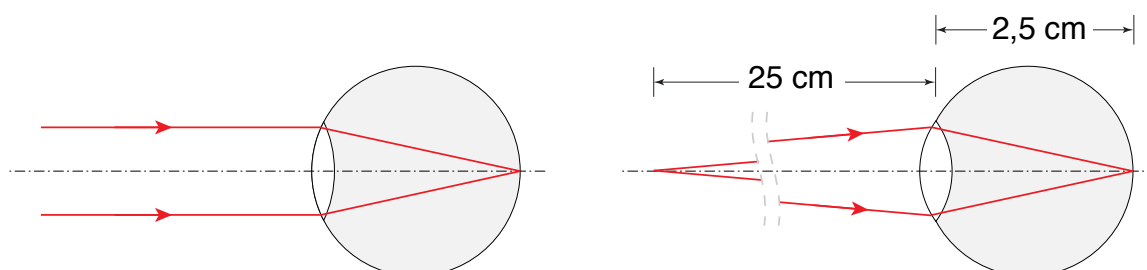


Figura 2: Esquema do olho no caso de objectos no infinito (esq.) e no ponto próximo (dir.).

O tamanho aparente dum objecto é determinado pelo tamanho que a imagem apresenta na retina. Mesmo sem variar o tamanho real do objecto, este pode ser visto maior se o aproximarmos do olho, porque o tamanho da sua imagem na retina é maior. A avaliação do tamanho da imagem na retina pode ser feita através da medição do ângulo θ , que corresponde à inclinação dos raios principais do extremo da imagem (Fig. 3).

Considere-se um objecto com altura h a uma distância s do olho. Para o objeto podemos escrever $\tan \theta = h/s$, e para a imagem na retina, y' , temos $\tan \theta = y'/(2,5 \text{ cm})$. Na aproximação paraxial, ou seja de ângulos pequenos, podemos usar $\tan \theta \approx \theta$, e assim $\theta \approx h/s = y'/(2,5 \text{ cm})$. Desta relação conclui-se que y' , tamanho da imagem na retina, é proporcional a h , tamanho do objecto, e inversamente proporcional à distância s entre o objecto e o olho.

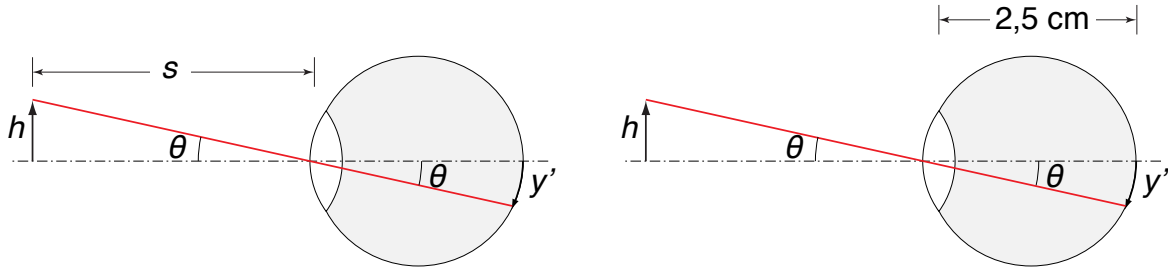


Figura 3: Formação de imagem na retina de um objecto de altura h a uma distância s .

1.2 Lupa

A lupa simples é o instrumento óptico mais elementar. Consiste numa só lente convergente e permite aumentar o tamanho aparente do objecto, ou seja, o tamanho da imagem na retina. Sabendo que a maior imagem que se pode obter dum objecto com o olho desarmado é quando o objecto está no ponto próximo (Fig. 4), e dado que y'_0 , tamanho da imagem na retina, é proporcional ao ângulo definido entre a altura do objecto h_0 e a sua distância ao olho, pode-se escrever a relação

$$\theta_0 = h_0/0,25 \quad (2)$$

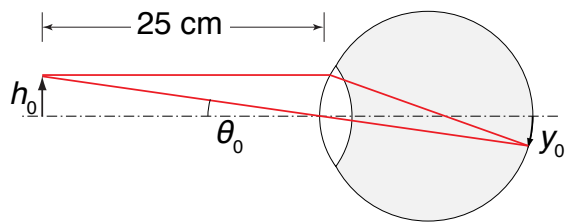


Figura 4: Objecto no ponto próximo visto pelo olho desarmado.

Na visão auxiliada pela lupa, esta é colocada perto do olho, e o objecto colocado a uma distância inferior ao foco. A imagem produzida pela lupa é virtual, ampliada e direita.

A *ampliação angular* M_A dum instrumento óptico é determinada pela razão entre y'_a , dimensão da imagem na retina quando o objecto é visto através do instrumento (Fig. 5), e y'_0 , dimensão da imagem na retina quando vista pelo olho desarmado e o objecto no ponto próximo. Também a razão entre os respectivos ângulos permite esse cálculo, isto é

$$M_A = \frac{y'_a}{y'_0} = \frac{\theta_a}{\theta_0} \quad (3)$$

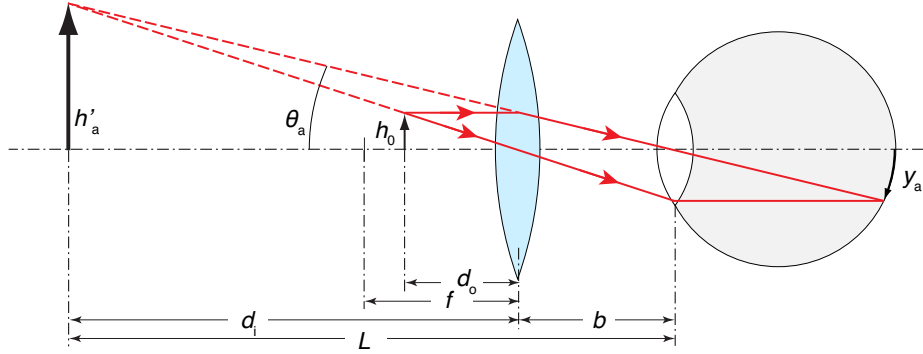


Figura 5: Formação de imagem com o auxílio de uma lupa a uma distância b do olho. O objecto h_0 está a uma distância $d_o < f$ da lente, e a imagem (virtual) h'_a aparenta estar a uma distância d_i da lente e L do olho.

Tirando partido da aproximação paraxial, temos $\tan \theta_a = h'_a/L \approx \theta_a$ e $\tan \theta_0 = h_0/0,25 \approx \theta_0$, portanto pode-se escrever a ampliação angular como:

$$M_A = \frac{h'_a/L}{h_0/0,25} = -\frac{d_i 0,25}{d_o L} = \frac{0,25}{L} \left(1 - \frac{d_i}{f}\right) \quad (4)$$

onde na última igualdade se recorreu à equação dos focos conjugados. Como a distância à imagem é negativa, $d_i = -(L-b)$, obtém-se por fim

$$M_A = \frac{0,25}{L} \left(1 + \frac{L-b}{f}\right) \quad (5)$$

Da análise desta expressão pode-se dizer que a ampliação diminui se L ou b aumentam. Existem três casos particulares de ampliação:

1. Se $b = f \rightarrow M_A = \frac{0,25}{f}$
2. Se $b = 0 \rightarrow M_A = 0,25 \left(\frac{1}{L} + \frac{1}{f}\right)$. Se $b = 0$ e também $L = 0,25$ m (valor mínimo para L , uma vez que a imagem também deve poder ser focada correctamente pelo olho), então obtém-se para M_A o valor máximo, igual a $M_A = 1 + \frac{0,25}{f}$. Este caso corresponde a ter a lupa "encostada" ao olho, e a imagem aumentada surge à distância do ponto próximo.
3. Se o objecto é colocado no foco ($d_o = f$), então a lupa forma a sua imagem no infinito ($L = \infty$) e a ampliação é $M_A = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{0,25}{L} \left(1 + \frac{L-b}{f}\right) = \frac{0,25}{f}$. Neste caso, o olho recebe raios paralelos e não necessita de fazer acomodação, o que é mais cómodo, e a ampliação apenas se reduz de uma unidade relativamente ao caso 2.

2 Microscópio composto

O microscópio é o instrumento óptico empregado para observar objectos pequenos, colocados muito próximos do instrumento. Na sua forma mais simples, consiste em duas lentes convergentes. A lente mais próxima do objecto (*objectiva*) tem uma distância focal f_{obj} menor que a distância focal f_{ocu} da lente mais perto do olho (*ocular*) (Fig. 6).

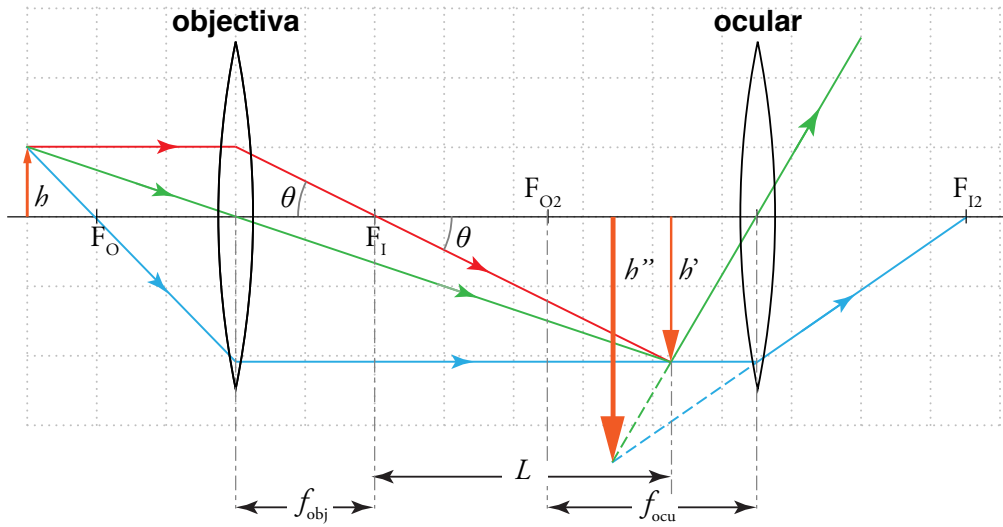


Figura 6: Formação de imagem num microscópio.

Um objecto de altura h é colocado, em relação à objectiva, mais afastado do que o foco desta, de modo a produzir uma imagem de tamanho h' que é real, invertida e maior que o objecto. A objectiva produz uma imagem com *ampliação transversal linear* M_T , dada por:

$$M_T = \frac{h'}{h} = -\frac{L \tan \theta}{f_{obj} \tan \theta} = -\frac{L}{f_{obj}} \quad (6)$$

O sinal negativo indica que a imagem é invertida e, uma vez que é real, a imagem pode ser projectada sobre um alvo para se medir o seu tamanho.

A lente ocular é usada para aumentar a imagem formada pela lente objectiva. Assim, a ocular é colocada de modo a que a imagem h' produzida pela objectiva (agora *objecto virtual* da segunda lente) venha localizar-se a uma distância ligeiramente inferior ao seu foco f_{ocu} . Nesta condição, a ocular actua como uma simples lupa, que permite trazer o objecto h' para uma distância mais curta do que o ponto próximo (0,25 m), e produz a imagem h'' . Esta imagem, maior que o objecto e virtual, pode ser medida com um ecrã transparente.

A *ampliação final* M é dada pelo produto da ampliação linear para a lente objectiva e a ampliação angular obtida para a lente ocular,

$$M = \frac{h''}{h} = M_T \times M_A = \frac{h'}{h} \times \frac{0,25}{f_{ocu}} = -\frac{L}{f_{obj}} \times \frac{0,25}{f_{ocu}}. \quad (7)$$

2.1 Procedimento Experimental

Material: Lente objectiva $f = 75$ mm e ocular $f = 150$ mm.

1. Na folha quadriculada em anexo desenhe um diagrama de traçado de raios, com o objecto a uma distância do foco igual $\approx f/5$. Obtenha a posição da imagem intermédia e da imagem final.
2. Monte o esquema como indicado na Fig. 6.
3. Projecte sobre um ecrã a imagem h' claramente focada e meça a sua ampliação.
4. Ajuste a ocular de modo a ver uma nova imagem, h'' , focada.
5. Sobre o ecrã transparente visualize a imagem virtual h'' . Foque bem em simultâneo a escala do ecrã e a imagem virtual.
6. Meça a ampliação final e compare com a ampliação teórica.

3 Telescópio

O telescópio é o instrumento óptico utilizado para observar, em geral, grandes objectos muito afastados do instrumento, procurando trazer a imagem do objecto para mais perto. O tipo de telescópio que vamos construir é composto por duas lentes convergentes: a lente objectiva tem distância focal f_{obj} maior que a distância focal f_{ocu} da lente ocular (Fig. 5).

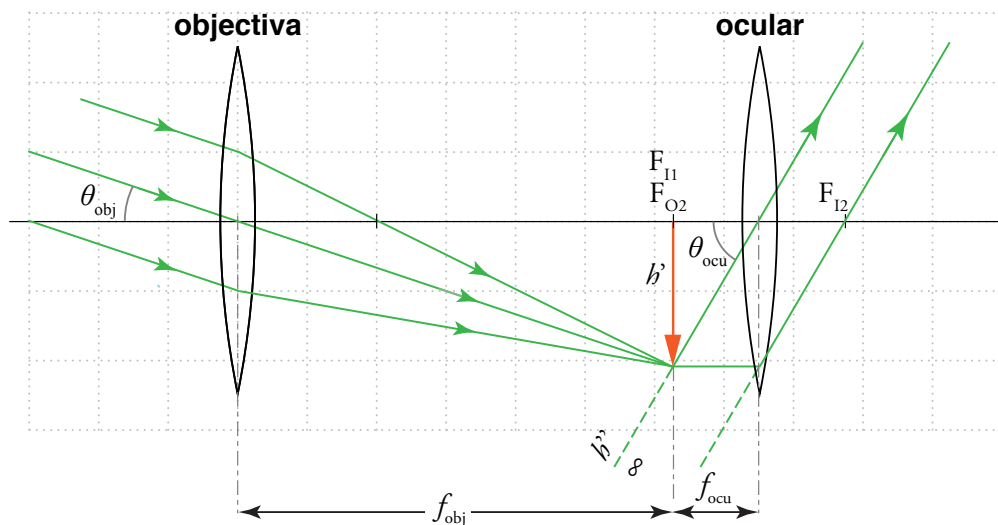


Figura 7: Formação de imagem num telescópio.

A objectiva vai produzir uma imagem real, invertida e localizada no foco f_{obj} , dado que o objecto está no infinito. Esta imagem é muito mais pequena do que o objecto e a finalidade da objectiva não é de aumentar, mas apenas de produzir uma imagem perto do observador que deve coincidir com o foco, f_{ocu} da lente ocular. Assim, as lentes estão separadas de uma distância igual a $f_{obj} + f_{ocu}$.

A ampliação de um telescópio é apenas a ampliação angular dada pela razão do ângulo θ_{obj} definido pelo objecto e do ângulo θ_{ocu} definido pela imagem final. Usando a aproximação paraxial e tendo em conta que a imagem é invertida, temos

$$\tan \theta_{obj} = -\frac{h'}{f_{obj}} \approx \theta_{obj} \quad \tan \theta_{ocu} = \frac{h'}{f_{ocu}} \approx \theta_{ocu} \quad (8)$$

e portanto a ampliação final é

$$M = M_A = \frac{\theta_{obj}}{\theta_{ocu}} = -\frac{f_{obj}}{f_{ocu}}. \quad (9)$$

3.1 Procedimento Experimental

Material: Lente objectiva $f = 150$ mm e ocular $f = 75$ mm.

1. Na folha quadriculada em anexo desenhe um diagrama de traçado de raios, utilizando como objectiva a lente mais potente do trabalho de Óptica Geométrica, e considerando o objecto no infinito. Obtenha a posição da imagem intermédia (plano focal) e determine a posição da ocular que permite obter um feixe de raios paralelos (imagem no infinito).
2. Monte o esquema como indicado na Fig. 7.
3. Num extremo da sala, junto à porta, aponte para a escala colocada na parede do fundo (próximo da janela).
4. Ajuste a distância entre as lentes de modo a trazer a imagem para o foco.
5. Para medir a ampliação, olhe com um só olho para a imagem e com o outro olho o objecto directamente.
6. Relacione os tamanhos da imagem final e do objecto e compare com a ampliação teórica.

4 Goniómetro de Babinet

O goniómetro é um instrumento que permite medir ângulos com grande precisão, e muito utilizado em óptica. O goniómetro de Babinet tem uma base central quase cilíndrica com uma plataforma que roda em torno do eixo vertical daquela, onde é colocado o prisma (ou a rede de difração) a caracterizar (Figura 8).

O goniómetro vem equipado com dois elementos ópticos: um *colimador* e uma *luneta*. Ambos estão montados radialmente, o colimador fixo e a luneta podendo rodar em torno do eixo da base (Figura 3). As posições angulares da plataforma (e portanto do prisma) e da luneta podem ser lidas num limbo graduado por intermédio de nónios solidários, respetivamente com a plataforma e a luneta. Existem dois parafusos micrométricos, cada um associado a cada um dos nónios, que permitem com facilidade regular e fazer leituras das posições angulares, com resolução de $30''$ (meio minuto de grau).

O colimador é constituído por dois tubos cilíndricos concêntricos que se podem deslocar axialmente. Um deles possui uma fenda retilínea, de largura variável por um parafuso, e que deve ser colocada na vertical (pode utilizar a mira da ocular depois de regulada). O outro tubo tem no extremo oposto (mais próximo do eixo) uma lente convergente, L_C . O objetivo deste conjunto, quando a fenda é iluminada por uma fonte luminosa divergente,



Figura 8: Goniómetro de Babinet (modelo Philippe Harris Advanced Spectrometer 30).

é produzir um feixe de raios paralelos na região da plataforma, onde se coloca o prisma, rede, ou espelho. A fenda, se for relativamente estreita, vai funcionar como objeto linear.

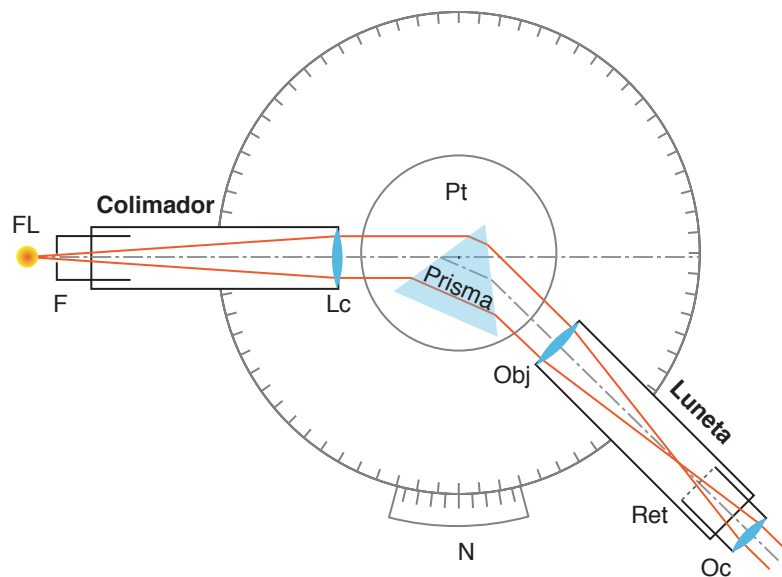


Figura 9: Esquema do Goniómetro de Babinet. Legenda: FL – fonte luminosa, F – fenda, Lc – lente convergente do colimador, Pt – plataforma, Obj – objetiva, Oc – ocular, Ret – retículo, N – nónio acoplado à luneta

A luneta é constituída por dois elementos ópticos, uma lente convergente e uma ocular munida de retículo (dois fios cruzados perpendicularmente). A primeira lente produz no seu plano focal a imagem intemédia da fenda, que é projetada no plano do retículo e ampliada pela ocular. A ocular é regulada pelo observador, de modo a ver uma imagem focada da fenda. Quando se dispõe de um sistema de deteção (placa fotográfica ou um detetor, por exemplo uma célula fotoelétrica com um sistema de amplificação), este é colocado diretamente no plano focal da lente convergente e é retirada a ocular. A regulação do instrumento pelo utilizador é feita sempre na seguinte ordem:

1. Focar o retículo para um olho sem necessidade de acomodação (relaxado) e alinhá-lo com a vertical usando um fio de prumo, ou alguma linha vertical no laboratório.
2. Focar a ocular observando um objecto no infinito (ou quase).
3. Alinhar a luneta e o colimador para observar a fenda iluminada. Focar a imagem da fenda, regulando APENAS o parafuso do colimador.
4. Alinhar a fenda com a vertical, sobrepondo a mira e reduzir a sua largura para um valor suficientemente estreito, embora claramente visível.

4.1 Procedimento experimental

Material utilizado

- goniómetro
- fonte de luz incandescente (candeeiro)
- luz espectral de Hg ou He
- prisma
- rede de difração
- nível graduado

Procedimento

1. Disponha o goniómetro em frente a uma fonte luminosa de luz incandescente.
2. Comece por regular a ocular da luneta do goniómetro. Para isso deve ver nitidamente com um olho os fios do retículo, e simultaneamente com o outro olho ver um objeto no exterior da luneta afastado a cerca de 30 cm.
3. Para regular a objetiva, observe agora um objeto no “infinito” (no laboratório escolha um objeto mais afastado possível) atuando sobre o parafuso da luneta. Regule de modo a observar o objeto e o retículo bem focado e sem paralaxe.
4. Coloque a luneta alinhada de frente do colimador e regule o parafuso do colimador de modo a observar a fenda focada quando iluminada pela lâmpada espectral.
5. Com a ajuda do nível de bolha, verifique o nivelamento horizontal do goniómetro e da plataforma onde vai colocar o prisma.
6. Identifique as escalas dos ângulos, para medir a posição da plataforma e da luneta. Como estão relacionadas as duas escalas opostas. Qual a resolução mínima do conjunto escala/nónio?
7. Observe a reflexão em cada face que define o ângulo do prisma e registre a posição angular correspondente a essas reflexões. Cada observador deve fazer uma determinação usando o parafuso micrométrico e centrando a imagem da fenda com o retículo por aproximação à direita e à esquerda. Calcule o ângulo principal entre as duas faces polidas do prisma através desta medição.
8. Substitua no centro da plataforma do goniómetro o prisma por uma rede de difração de 600 linhas por milímetro, e a fonte por uma luz espectral (lâmpada de mercúrio ou hélio). Observe os raios *difratados* de várias cores, em 1.^a e 2.^a ordem. Tente medir os ângulos de desvio, com a melhor precisão possível.

