

Óptica Geométrica: Introdução a imagens e experiência com espelhos cilíndricos.

Formação de imagens.

A imagem mais primitiva é a das sombras, que funciona pelo princípio da propagação retilínea da luz combinado com sua absorção pelos objetos.

Uma sombra só serve para mostrar objetos que estão entre ela e a direção da fonte luminosa, e sua nitidez depende do tamanho dessa fonte (**Fig.1**) que gera para todo ponto objeto um círculo de penumbra que indicaremos pela letra **c**.

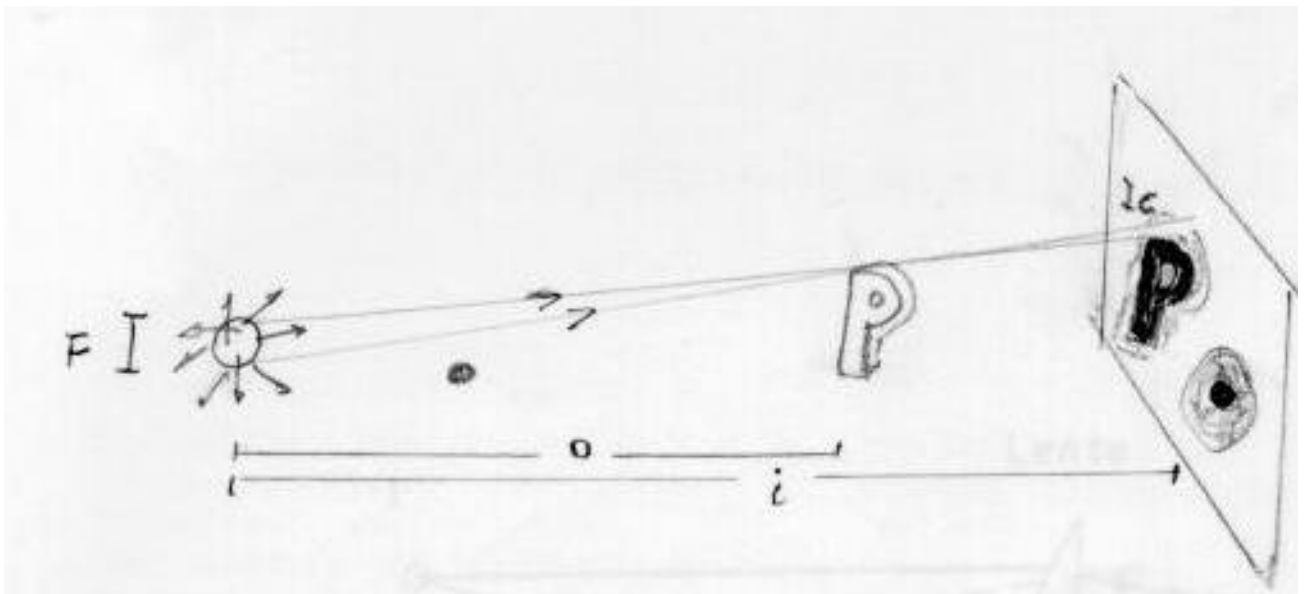


Fig.1: Nitidez nas sombras

$$c = F (i - o) / o$$

Alem de ter sido reveladoras ao homem de sua silhueta, de ter gerado uma variedade interessante de teatro e de ter servido como uma técnica barata de retrato no passado, as sombras são de extremada utilidade quando utilizadas com radiação X. Observe na Fig.1 como os objetos mais próximos aparecem mais nítidos, e entenda assim o fato de se colocar sempre ao paciente próximo da chapa radiográfica.

Uma outra maneira interessante de formar imagens por absorção de luz é a câmara de furo. Consiste apenas de um furinho na frente de uma caixa e uma tela translúcida como fundo da caixa. O furinho seleciona

um feixe fino saindo de cada ponto luminoso no objeto, e o projeta na tela recriando uma figura do objeto (**Fig.2**).

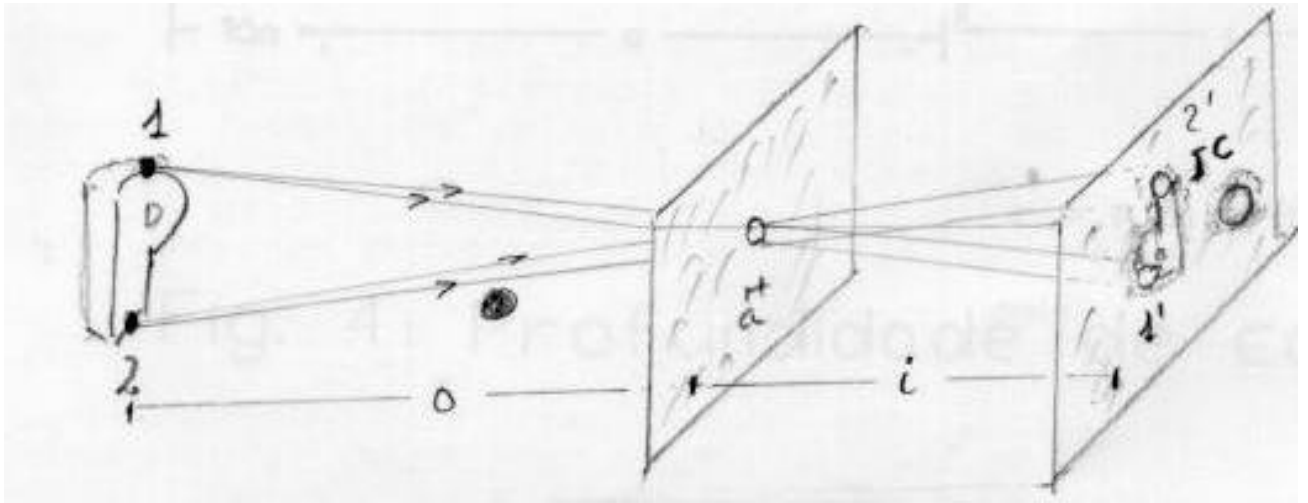


Fig.2: Câmara de furo.

$$c = (o+i) a/o$$

Imagens por lentes:

Em princípio poderíamos gerar a imagem de qualquer objeto por meio de uma câmara de furo, porém na prática apenas servem os muito brilhantes, porque o diâmetro do furo deve ser pequeno para haver nitidez. É muito útil se familiarizar com este dispositivo porque define o tamanho da imagem projetada por qualquer sistema óptico, e explica sua posição invertida. Isto porque toda lente possui um centro por onde os raios não são desviados e age assim como o furo da câmara de furo. O restante da lente age como um sistema de prismas que leva a luz que passa por eles a se concentrar na mesma posição que os raios que passaram pelo centro, definindo assim a focalizaç_c (**Fig.3**). Sabia que a pessoa que mostrou esse efeito pela primeira vez foi condenado por bruxaria?. Mas a câmara de furo, que deu lugar à câmara escura ao levar uma lente, foi a base para muitos dos artistas da época da renascença, como Leonardo da Vinci.

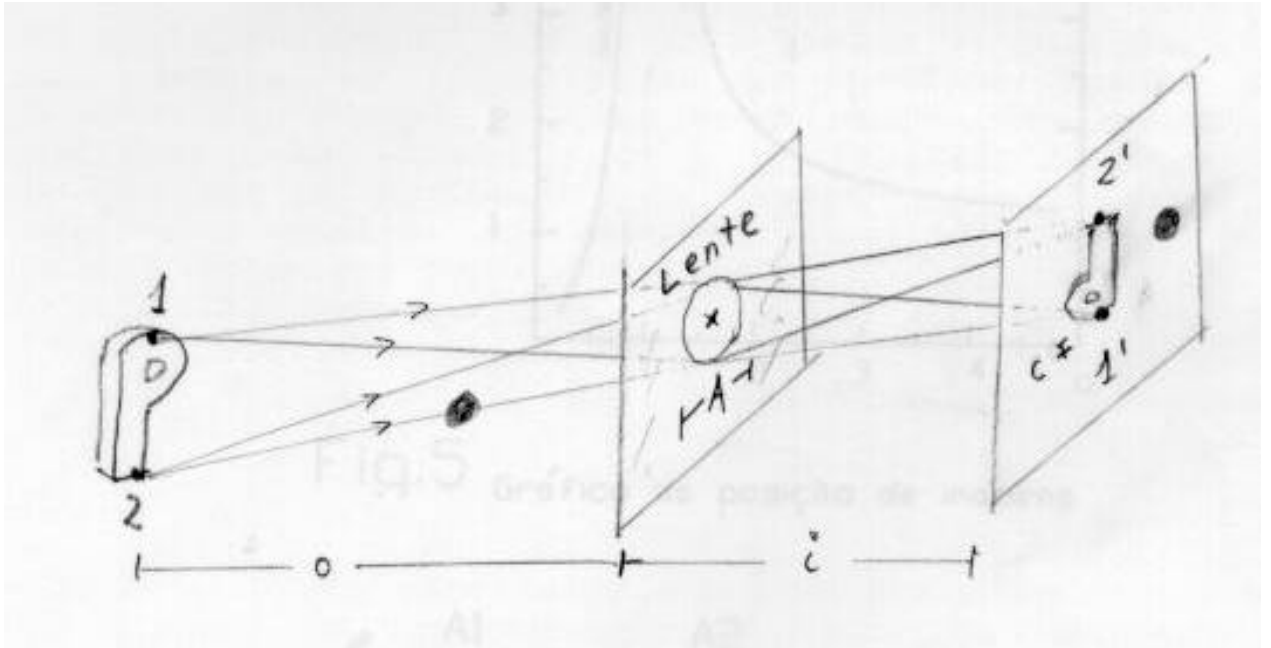
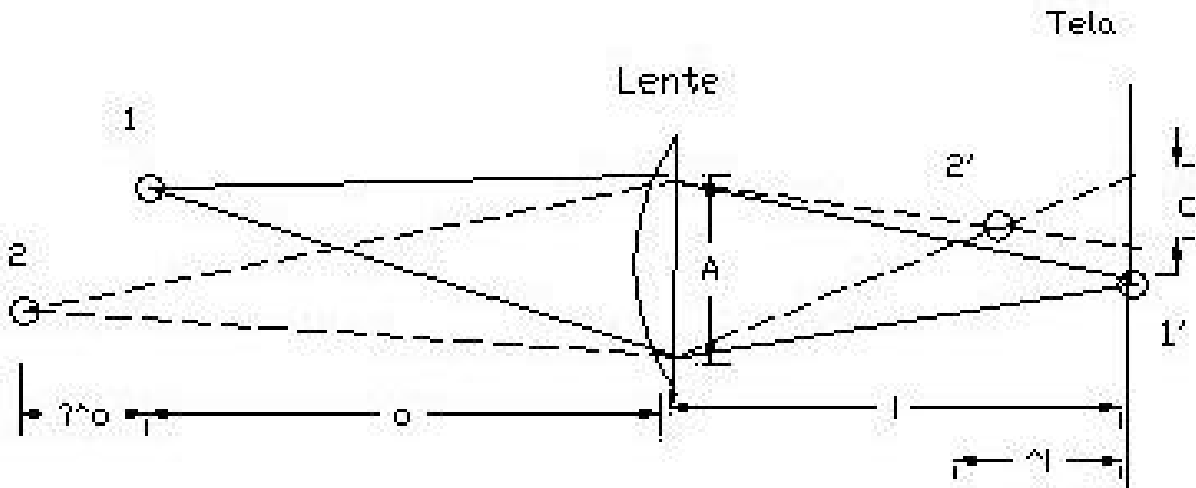


Fig. 3: Imagem por lente.

Obtém-se desta maneira mais brilho porem reduzindo as possibilidades de nitidez na profundidade da cena, que dependem do diâmetro de abertura da lente (**Fig.4**)



$$c = A \lambda / (i - \Delta i)$$

Fig. 4 Profundidade de campo

$$c = A \Delta i / (i - \Delta i)$$

O tamanho limite c da resolução acontece, mesmo que a lente fosse perfeita, por efeitos de difração, sendo λ o comprimento de onda. É

isto que limita a nitidez de uma objetiva fotográfica e também de nosso olho. Nesse caso a nitidez tem o valor limite:

$$c = 2,44 \lambda \frac{i}{a}$$

É fácil identificar as características principais das lentes de óculos com uma lâmpada afastada ou com o sol: nas lentes convergentes (hipermetropia), grau +) vemos sobre um papel branco a forma da lente como um feixe que vai se concentrando. A posição onde se concentra é aproximadamente a distância focal, e a inversa deste valor medido em metros o grau (dioptrias). Nas lentes divergentes (miopia) a forma, por vez de convergir, vai se ampliando. Nas lentes cilíndricas (astigmatismo) a convergência ou expansão acontece mais numa direção do que em outra, definindo a posição do eixo de astigmatismo. Nas lentes multifocais, o resultado varia segundo a região da lente que está sendo iluminada.

As imagens por lentes e espelhos não necessariamente são visíveis como projeção sobre uma tela. Os pontos imagem estão focalizados no espaço e podemos vê-los colocando os olhos na posição dos raios luminosos 30cm ou mais por trás da imagem. Lembremos que o olho humano não focaliza em distâncias menores. Se colocarmos o olho exatamente na posição da imagem somente focalizaríamos luz de outras partes do sistema óptico, sem poder perceber a relação disto com a imagem. A imagem acontece no espaço tridimensional, porém raramente os sistemas ópticos tem abertura angular suficiente como para permitir que os dois olhos vejam simultaneamente a imagem, daí a perda aparente de tridimensionalidade por falta de visão binocular.

Todo sistema que concentra raios na distância f obedece necessariamente a relação: $1/o + 1/i = 1/f$, válida dentro de algumas aproximações. Esta relação define o caso dos três raios principais: raio paralelo ao eixo óptico passa pelo foco imagem, raio que passa pelo foco objeto sai paralelo ao eixo óptico, raio que passa pelo centro não é desviado. Como na verdade a condição principal para definir o eixo óptico é a de passar pelo centro, a situação para raios que fazem ângulo com o eixo óptico poderia ser entendida como uma simples mudança de ângulo deste eixo.

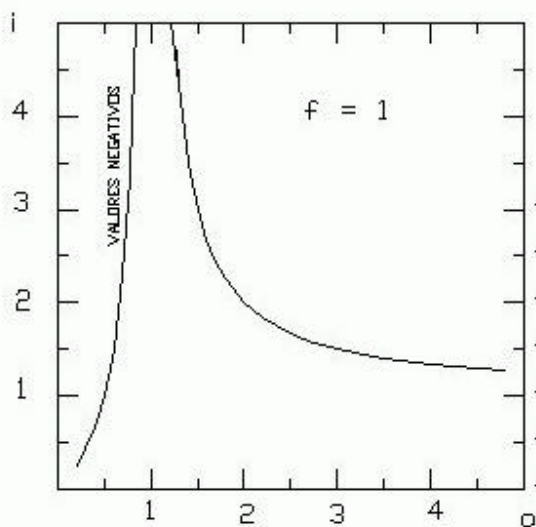


Fig. 5: Gráfico da posição de imagens

$$1/o + 1/i = 1/f$$

O gráfico da **Fig.5** serve para obter a posição das imagens de um sistema convergente de distância focal unitária, bastando multiplicar a ordenada obtida pelo valor da focal para obter o resultado com qualquer focal. A parte da imagem virtual foi colocada com valor oposto para caber melhor no gráfico. A passagem do objeto pela região próxima do foco surge como uma explosão da imagem porque a variação da imagem é muito rápida. Ela passa de menos infinito a infinito simplesmente pelo fato de que os raios estão paralelos ao eixo óptico e podem se inclinar para frente ou para trás.

Aberrações:

A convergência dos raios sobre um único ponto imagem não é perfeita, e acontecem desvios que assumem diversas formas geométricas chamados aberrações. Uma lente única gera aberrações sempre visíveis, muito mais graves se a imagem vai ser ampliada, como no caso das fotografias, da projeção de diapositivos (em inglês "slides"), ou das filmadoras de vídeo, p.ex.. Por isto são construídos sistemas de lentes chamados de objetivas, onde cada lente ajuda a corrigir as aberrações da anterior.

Uma das mais complexas é a de uma câmara de TV profissional com zoom, como a que mostra um campo de futebol e, em seqüência contínua vai se aproximando até mostrar a bola nos pés de um jogador. Essas podem conter umas 30 lentes feitas de umas 13 variedades de vidro óptico. Também por causa das aberrações uma objetiva só pode ser usada corretamente dentro da configuração de posições de objetos e imagens originais. Saindo dos valores para os que foi calculada (como no caso simples de inverte-la) não vai funcionar com a mesma nitidez. É por isto que existe um tipo de objetiva para cada função: fotografar, ampliar, projetar, etc..

Uma objetiva zoom consegue mudar o valor de sua distância focal alterando a separação entre as lentes e pode assim abranger uma área de tamanho regulável. Esta versatilidade acontece às custas de um pouco de nitidez, por isto os fotógrafos profissionais ainda trocam de objetiva para mudar de focal.

Espelhos côncavos:

Se tentarmos polir uma pedra cavando com ela contra uma pedra fixa acontece naturalmente que a pedra que acionamos com a mão resulta esférica e a pedra fixa, côncava. Isto já era usado pela civilização Olmeca (no atual México, há aproximadamente 2.000 anos http://www.geocities.com/prof_lunazzi/Olmecas/Olml.htm) para construir espelhos de alta qualidade que mostravam a imagem do rosto (convexos) ou concentravam o sol fazendo fogo (côncavos). Hoje usamos espelhos nos concentradores solares (para secagem de grãos, p.ex.), para uso na cosmética (côncavos), para melhorar o campo de visão em esquinas de rua ou em lojas (convexos) nas lâmpadas de projetores e refletores (em cenários, carros, etc.) para ativar a maioria dos lasers, nas mais potentes teleobjetivas fotográficas e, na forma parabólica, nos

telescópios, no radar, antenas para microondas (recepção de satélite, p.ex.) etc.

Exemplo: é muito útil entender a situação que segue no desenho, para responder à pergunta: "O que vê a pessoa?". É o caso onde a imagem vai exatamente no olho do observador, e vale, claro, também para lentes. Mas com espelhos é mais interessante porque depois podemos substituir ao objeto pelo próprio olho do observador, e temos quatro situações, segundo afastamos o espelho côncavo do olho:

- 1) espelho muito perto do olho (imagem pouco nítida)
- 2) imagem nítida do olho (a imagem é direita)
- 3) espelho em posição que não oferece detalhe algum
- 4) imagem invertida e pouco nítida

Entendendo estas quatro situações (uma delas é a da figura), teremos avançado bastante no uso prático de sistemas formadores de imagens.

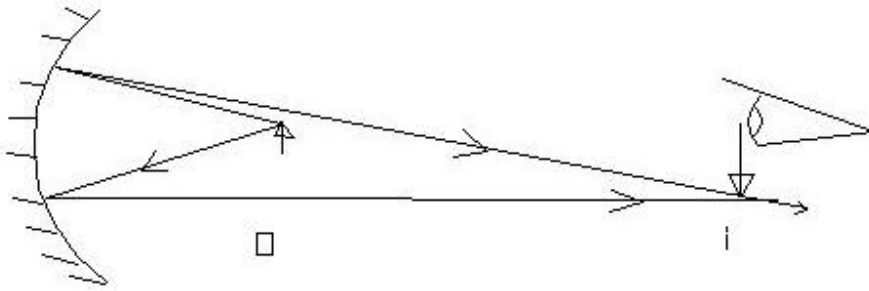


Fig. 6: Imagem acontecendo na entrada do olho.

Espelhos Cilíndricos:

As imagens destes espelhos acontecem de uma maneira dual: enquanto num plano agem como esféricos, no plano perpendicular a esse agem como planos.

O resultado é que focalizam imagens em posições diferentes, p.ex., uma horizontal e outra vertical, sendo uma delas sempre virtual e simétrica do objeto em relação ao espelho. Este tipo de defeito chama-se astigmatismo, mas resulta tolerável se observamos desde uma certa distância, porque o tamanho relativamente pequeno da pupila do olho gera a seleção de um feixe fino onde a divergência da imagem virtual acaba tendo pouco efeito na imagem. Por isto, se olharmos a imagem de um objeto colocando a curvatura do espelho num plano horizontal veremos as imagens acontecerem como num espelho côncavo, geralmente a frente do espelho. Porém, nunca invertida.

Assim, as imagens resultam comprimidas ou expandidas na direção horizontal, o que foi aproveitado no Cinemascope, onde as imagens são comprimidas para caberem num filme de formato normal (35mm) e descomprimidas na projeção sobre tela muito mais larga que a correspondente a esse formato.

No laboratório didático usamos espelhos cilíndricos porque são mais fáceis de se conseguir, simplesmente cortando e espelhando vidro de garrafa. O espelhamento convencional se consegue por meio de uma solução química que deposita prata, mas como a prata oxida facilmente em contato com o ar, só pode ser colocada por detrás do vidro com uma camada protetora. Para evitar o efeito de refração no vidro e simplificar a compreensão da experiência podemos espelhar a primeira superfície por meio de alumínio vaporizado sob vácuo. Ele não escurece na oxidação, porém devemos ser muito cuidadosos e não tocar essa superfície porque não pode ser limpada.

Superfícies parabólicas ou superfícies esféricas?

Se colocamos uma pequena lâmpada longe de um espelho côncavo e colocamos uma tela (papel branco) perpendicularmente a ele veremos acontecer na região de focalização uma figura muito particular, e não uma perfeita convergência sobre um ponto. Se reduzirmos a abertura do espelho a luz vai tomar uma forma mais definida, até dar um estreito triângulo que converge num ponto. Isto acontece porque a convergência dada por cada parte do espelho não resulta no mesmo ponto. Se procuramos corrigir isto, teríamos que a superfície ideal seria a de uma parábola. Uma parábola precisa não é fácil de construir, porque não acontece naturalmente como a esfera. Por outro lado, se o feixe deixa de incidir pelo eixo da parábola para incidir inclinado, a perda de concentração luminosa é maior do que com a superfície esférica. De maneira que a esfera, além de ser mais fácil de fazer, é a melhor solução em média para uma extensão de pontos luminosos. No caso dos telescópios, é necessário ter grande concentração luminosa e como sempre pode ser orientado na direção do astro em observação, a superfície parabólica resulta a única solução.

Objetivos da experiência.

Medir a distância focal de um espelho côncavo verificando a lei básica da formação das imagens e a presença de aberrações.

Elementos:

1 espelho côncavo ou cilíndrico.
4 alfinetes
1 ou mais folhas de papel milimetrado tamanho ofício.
papelão
régua
lápiz
borracha

Procedimento:

1) Afixar o papel milimetrado sobre o papelão por meio de alfinetes nos cantos, marcar o perfil do espelho centrado sobre uma borda do papel milimétrico.
2) Colocar dois alfinetes (A_1, A_2) alinhados em direção ao espelho bem pela direita (**Fig.6**). Observar a imagem refletida na posição em que

aparecem alinhados e colocar mais dois alfinetes (A_3, A_4) alinhados na direção em que cobrem a imagem.

3) Retirar os alfinetes e marcar no papel sua posição com os números correspondentes.

4) Colocar dois alfinetes (A_5, A_6) na direção do espelho agora bem pela esquerda, observar sua imagem e marcar a reflexão com mais dois alfinetes (A_7, A_8).

5) Retirar os alfinetes, numerando todas as posições, e marcar com régua as direções de incidência e reflexão da luz.

6) Marcar a posição do foco (interseção dos raios refletidos) e a interseção de cada raio refletido com um raio incidente.

7) Verifique se está se cumprindo a relação $1/o + 1/i = 1/f$ considerando como o e i a distância entre as interseções do caso anterior e o espelho, medidas paralelamente ao eixo óptico.

8) Repita todo o procedimento de maneira que os raios incidam próximos do centro do espelho. Desenhe agora os raios com linhas tracejadas para não usar nenhum dos raios do caso anterior.

9) Interprete as 4 interseções não focais como pares de pontos objeto-imagem. Encontre uma combinação de pontos objeto que formariam os extremos de uma flecha objeto, e as correspondentes duas flechas imagem. Traçe o eixo óptico por meio de uma paralela aos raios incidentes que passe pelo foco principal e verifique se o aumento transversal cumpre a relação: $M_L = i/o$.

10) Tente identificar a presença de aberrações pela não coincidência das interseções no foco. Como depende esta posição do tamanho de abertura utilizado no espelho?.

11) Projete a luz do sol ou de uma lâmpada afastada pelo espelho no papel. O que acontece?. Interponha um pente na luz da fonte para ajudar na interpretação.

12) Aplique as tolerâncias nas posições dos alfinetes para obter a faixa de erro das interseções dos raios.

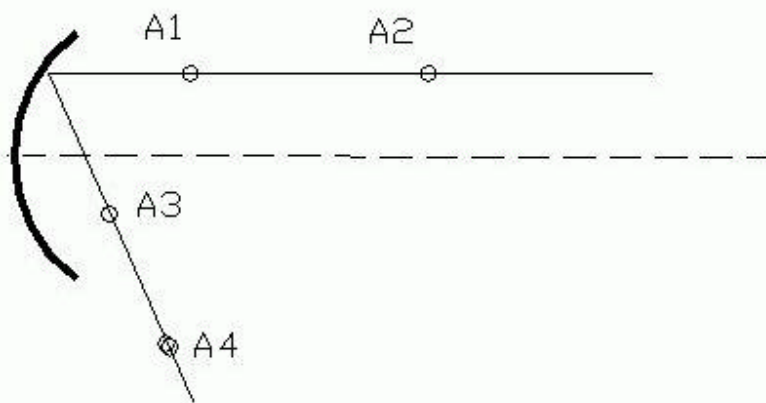


Fig.7: Obtenção da direção dos raios.

Perguntas:

- 1) Mostre que a relação $1/o + 1/i = 1/f$ demonstra as propriedades dos três raios principais. Discuta si as distâncias deveriam ser tomadas a respeito do centro do elemento ou de um plano tangente a ele.
 - 2) Quanto vale o limite de resolução por difração num espelho de 2cm de abertura e com luz verde? ($\lambda = 0,5\text{nm}$).
 - 3) Mostre o esquema de formação de imagens no caso de se colocar um espelho côncavo de focal curta bem próximo do olho para autoobservação.
 - 4) Quais as diferenças na formação de imagens com espelhos esféricos e com espelhos cilíndricos?.
 - 5) Aplique a mesma fórmula do círculo de confusão c de uma lente ac caso de um espelho de telescópio ($A = 5 \text{ m}$, $f = 6 \text{ m}$) e explique porque é válida a frase "Nunca ninguém viu uma estrela".
 - 6) Mostre com uma figura simples para onde se desloca o foco de um espelho côncavo quando sua abertura passa de pequena para grande.
-