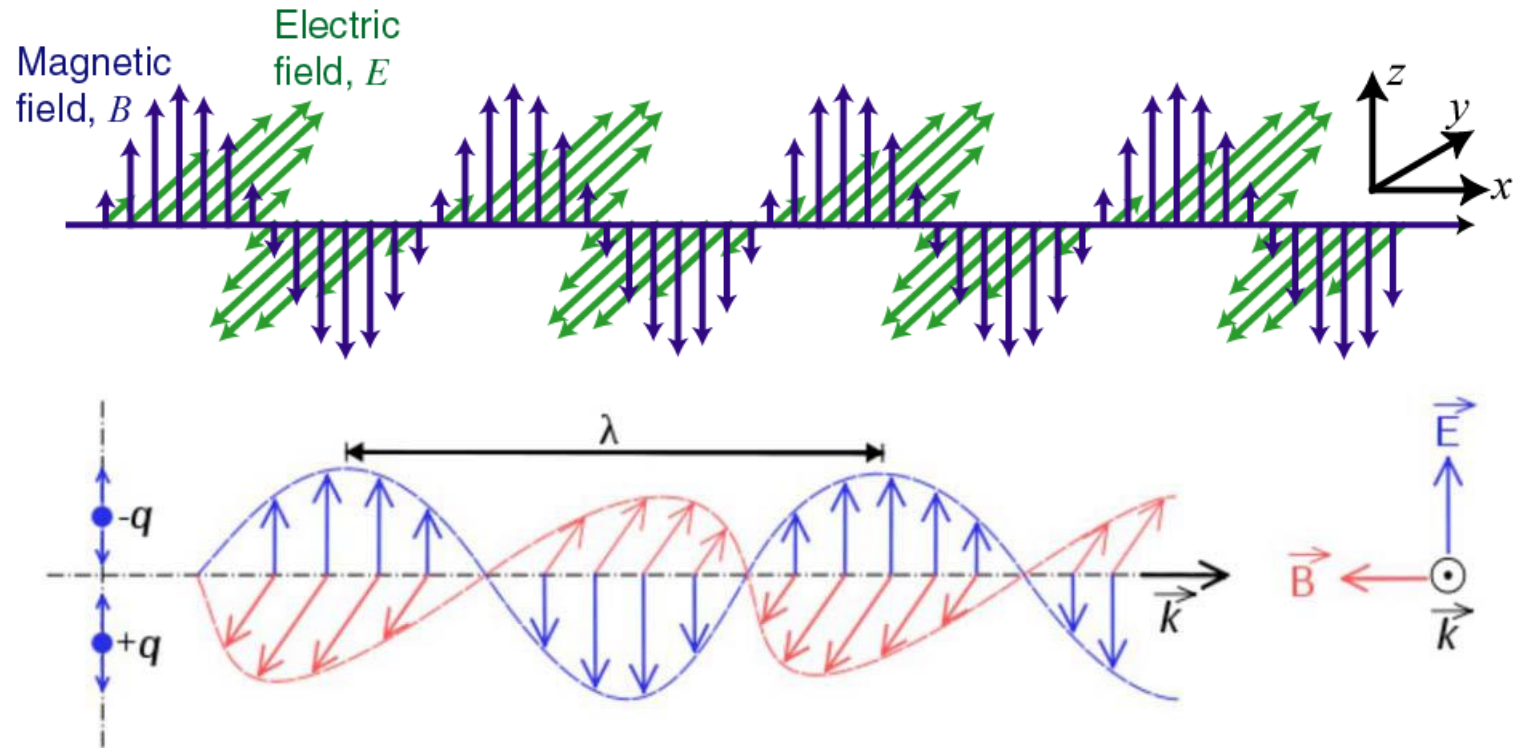


ÓTICA ONDULATÓRIA



5. Polarização – Generalidades



As ondas eletromagnéticas são transversais e os campos E e B estão sempre em fase

A polarização de uma dada radiação é a direção ou o plano de oscilação do seu vector campo elétrico. Se a radiação for despolarizada (luz natural) todas as direções são igualmente prováveis.

ÓTICA ONDULATÓRIA

5. Polarização – Generalidades

➤ REM despolarizada ou polarizada aleatoriamente

Diz-se que uma dada **radiação é polarizada** quando podemos identificar a direção de oscilação do seu campo elétrico e/ou magnético. A direção de oscilação de \vec{E} e/ou de \vec{B} é a direção de polarização da radiação. Neste caso diz-se que estamos perante radiação **linearmente polarizada**.

Luz natural – uma fonte de luz vulgar é formada por milhões de emissores atômicos. Cada átomo emite radiação numa dada direção, durante cerca de 10^{-8} s, mas não há qualquer correlação entre esta direção e a direção de emissão dos outros milhões de átomos que emitem ao mesmo tempo ou nos instantes anteriores ou seguintes. Em estado estacionário, o resultado é a emissão de **radiação não polarizada**, ou seja, o que ocorre é a **emissão de trens de onda polarizados mas em que a polarização de cada um é aleatória relativamente a todos os outros**.

Se as direcções de polarização são aleatórias, são todas igualmente prováveis, então podemos considerar, como modelo matemático da **radiação não polarizada**, a **sobreposição de duas ondas não coerentes, polarizadas linearmente segundo planos ortogonais e de igual amplitude**. (ver Fig.13, p.83)

Na prática deparamo-nos muitas vezes com **radiação parcialmente polarizada**, que pode ser modelizada como resultando da sobreposição de uma fracção (f) de radiação polarizada com uma fracção ($1-f$) de luz natural, despolarizada.

ÓTICA ONDULATÓRIA

5. Polarização – Generalidades

Poder de alguma forma alterar, manipular, controlar o estado de polarização da REM tem muitas vantagens e muitas aplicações tecnológicas

Os LCDs estão em todo o lado e a radiação que observamos é polarizada



ÓTICA ONDULATÓRIA

5. Polarização – Generalidades

As lentes (de óculos de Sol) polaroid (polarizadas) são muito comuns...!

GLARE-FREEVISION



Enjoy glare-free vision with Polaroid Polarized Sunglasses and learn more about polarization.

GLARE-FREEVISION



Enjoy glare-free vision with Polaroid Polarized Sunglasses and learn more about polarization.

WHAT IS POLARIZATION?

Daylight travels in waves oscillating in all directions of three-dimensional space. Polarized light also travels, but mostly moves in two dimensions: horizontally and vertically. Vertical light brings useful information to the human eye, enabling us to see colors and contrasts, while horizontal light simply creates optical noise or glare. Where light strikes a non-metallic surface such as water it often reflects primarily in a horizontal plane. This creates a high concentration of glare which can be selectively blocked only by a good quality polarizing filter.

Polarizing lenses selectively filter out the horizontal light, thus eliminating glare. Wearing Polaroid sunglasses means:

- Glare-free vision
- Enhanced contrasts
- 100% UV protection
- Significantly less eye-fatigue
- Outstanding color perception



ÓTICA ONDULATÓRIA

5. Polarização – Generalidades

O efeito dos polarizadores nas máquinas fotográficas é espetacular e por vezes inesperado. É um dos únicos efeitos que não pode ser “manipulado” no photoshop



Filtro polarizador

ÓTICA ONDULATÓRIA

5. Polarização – Generalidades



Polarizer rotated to pass polarized light (bottom), and rotated by 90° to block it, suppressing reflections and making it possible to see through the window (top).

ÓTICA ONDULATÓRIA

5. Polarização – Generalidades

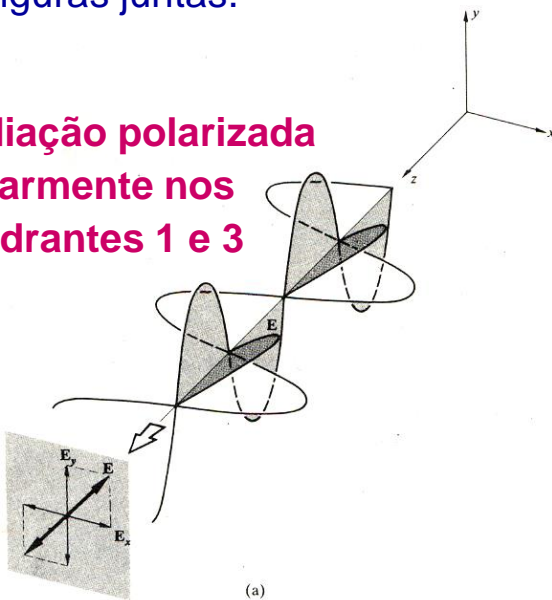
Consideremos dois campos de radiação, ortogonais, a propagarem-se ao longo do eixo dos z em que ε é a diferença de fase entre as duas ondas

$$E_x(z, t) = E_{0,x} \cos(kz - \omega t)$$

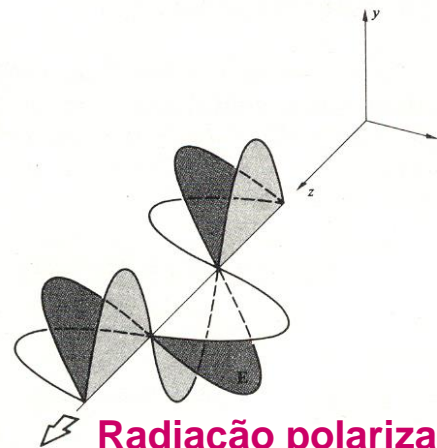
$$E_y(z, t) = E_{0,y} \cos(kz - \omega t + \varepsilon)$$

Quando $\varepsilon > 0$ E_y está atrasada em relação a E_x . Quando $\varepsilon < 0$ E_x está atrasada em relação a E_y . Se $\varepsilon = 0$ ou um múltiplo inteiro de 2π , os dois campos de radiação estão em fase, como se mostra nas figuras juntas.

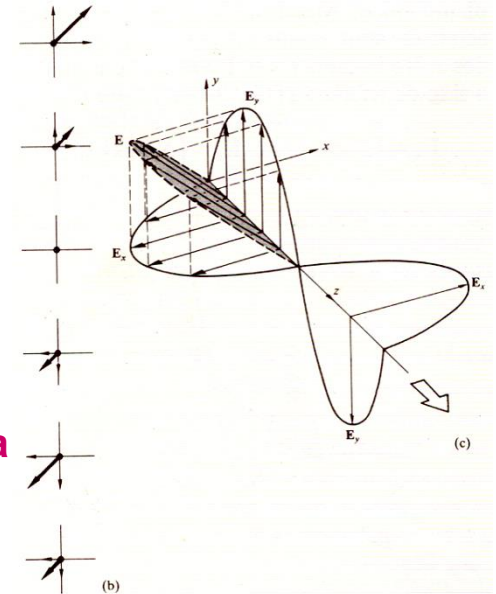
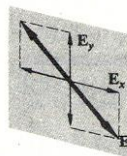
Radiação polarizada linearmente nos quadrantes 1 e 3



(a)



Radiação polarizada linearmente nos quadrantes 2 e 4

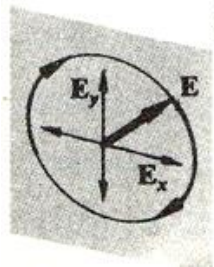
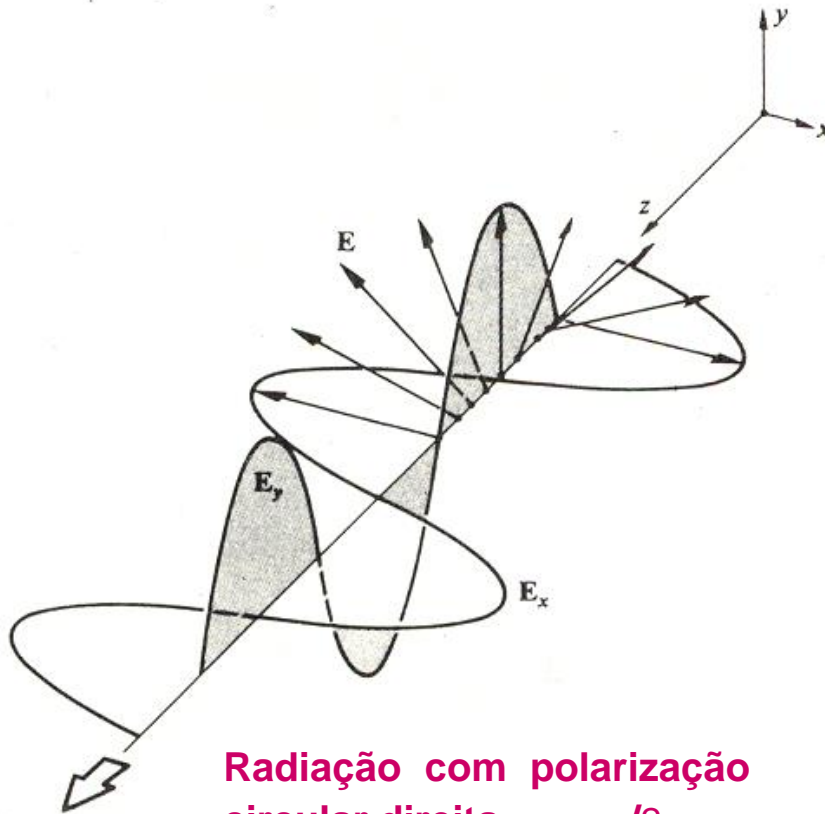


(c)

Inversamente, qualquer onda polarizada linearmente pode-se decompor em duas ondas com polarizações ortogonais.

III – ÓTICA ONDULATÓRIA

5. Polarização – Generalidades



Radiação com polarização circular direita, $\varepsilon = -\pi/2$

Na radiação com polarização circular esquerda, $\varepsilon = +\pi/2$

Uma situação interessante é quando os dois campos (duas ondas) têm a mesma amplitude mas estão desfasados de $\pi/2$, como se mostra na figura junta.

Neste caso a amplitude escalar do campo elétrico é constante e igual a E_0 .

A direção de E varia no tempo e descreve um círculo no plano xy.

Se as amplitudes dos dois campos não forem iguais obtém-se polarização elíptica.

III – ÓTICA ONDULATÓRIA

5. Polarização – Generalidades

Resumindo:

Tem-se **polarização linear** quando o vetor campo elétrico ou **só tem uma componente** ou tem duas componentes ortogonais que estão em fase ou com uma diferença de fase de π . Se as duas componentes ortogonais têm a mesma amplitude a radiação está polarizada a 45° , se as amplitudes das duas componentes forem diferentes pode-se calcular o ângulo que o vetor campo elétrico faz com uma dada direção.

Tem-se **polarização circular** apenas quando o vetor campo elétrico tem duas componentes ortogonais com a mesma amplitude e desfasadas de $\pm \pi/2$.

Tem-se **polarização elítica** se o vetor campo elétrico tiver duas componentes ortogonais desfasadas de $\pm \pi/2$ mas de amplitudes diferentes, ou se o vetor campo elétrico tiver duas componentes ortogonais desfasadas de um ângulo qualquer (exceto $0, \pm \pi/2, \pi, \dots$) e amplitudes iguais ou diferentes.

ÓTICA ONDULATÓRIA

5. Polarização – Generalidades

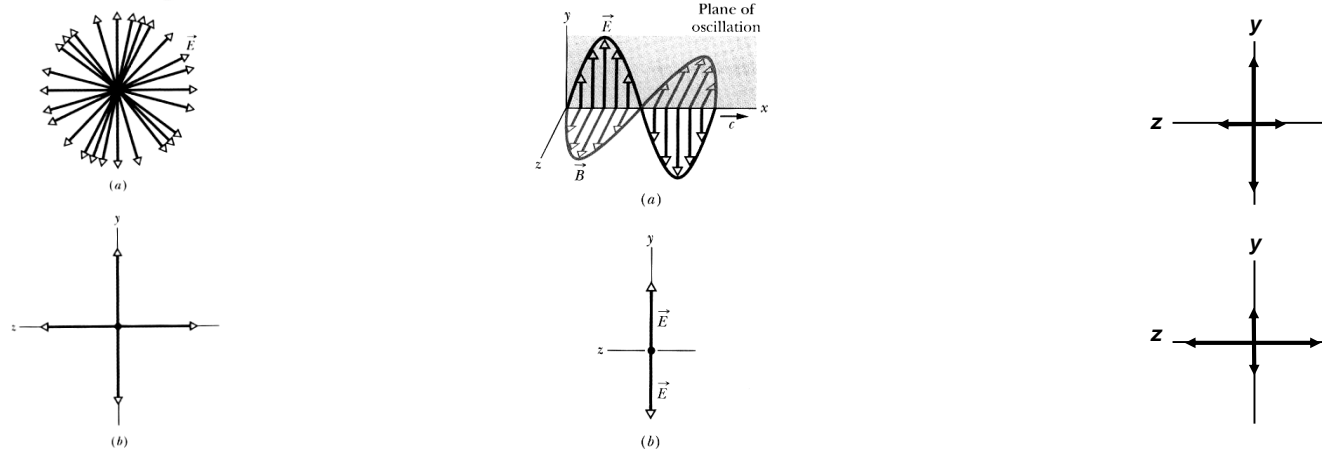


Fig.13

Radiação despolarizada

Radiação linearmente polarizada

Radiação parcialmente polarizada

Como é que se gera, altera ou manipula o estado de polarização de uma dada radiação? Usando **polarizadores**, que podem ser naturais ou não. **Um polarizador é qualquer dispositivo ótico que transforma radiação natural em radiação com algum tipo de polarização.**

É possível transformar **radiação despolarizada em radiação polarizada** por um dos seguintes quatro processos, que iremos abordar de seguida:

- 1 – Dicroísmo ou absorção selectiva
- 2 – Reflexão
- 3 – “Scattering”, espalhamento ou difusão (nunca dispersão)
- 4 – Birrefringência ou dupla refração e atividade ótica.

ÓTICA ONDULATÓRIA

5. Polarização – Generalidades

Mecanismos de produção de luz polarizada

Teoria eletromagnética – equações de Fresnel e mecanismo dipolar da radiação

- Polarização por Reflexão em dielétricos (2)
- Polarização por Difusão da radiação (Scattering) (3)

Anisotropia ótica dos materiais – assimetria na interação da radiação c/ a matéria (há direções espaciais em que a interação é mais forte; nessas direções a velocidade de propagação da radiação é menor, logo o índice de refração é maior)

- Polarização por absorção selectiva (dicroísmo) (1)
- Birrefringência linear (4)
- Birrefringência circular (atividade ótica) (5)

Na prática deparamo-nos muitas vezes com **radiação parcialmente polarizada**, que pode ser modelizada como a sobreposição de uma fracção (f) de radiação polarizada, com uma fracção ($1-f$) de luz natural.

$$I_0 = f I_0 + (1-f) I_0$$
$$I_0 = I_{pol} + I_{nat}$$

Define-se então percentagem de polarização

$$\% polarização = \frac{I_{pol}}{I_{pol} + I_{nat}} \times 100$$

que, como veremos adiante, se pode calcular por

$$\% polarização = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \times 100$$

ÓTICA ONDULATÓRIA

5. Polarização – Dicroísmo

Qualquer **alteração do estado de polarização da radiação**, que ocorra quando esta passa por um dado material, um **polarizador**, tem que ter por base uma **anisotropia das propriedades óticas do material que forma o polarizador**.

➤ (1) – **Dicroísmo ou absorção seletiva** – absorção selectiva de um dos dois estados de polarização ortogonais que constituem a radiação não polarizada.

O **dicroísmo** é uma propriedade de alguns **cristais naturais** (como por exemplo a **turmalina**) e dos **polaroides**. Consegue-se também um efeito dicroico com **grelhas de fios condutores paralelos**.

- Nos **cristais dicróicos**, devido à anisotropia da sua estrutura cristalina, pode-se identificar uma direcção preferencial, o **eixo óptico** (EO). Verifica-se que a componente do campo eléctrico perpendicular ao EO é preferencialmente absorvida e que a componente paralela ao EO é preferencialmente transmitida, como se mostra na **fig.14**, ou seja, depois de passar pelo cristal, **a REM sai polarizada paralelamente ao EO**.

(Normalmente nestes cristais a direcção do EO consegue-se ver a olho nu pois o cristal apresenta estrias ao longo dessa direcção)

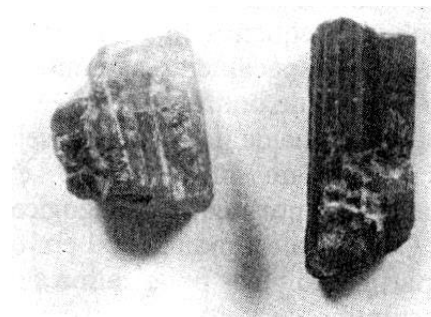
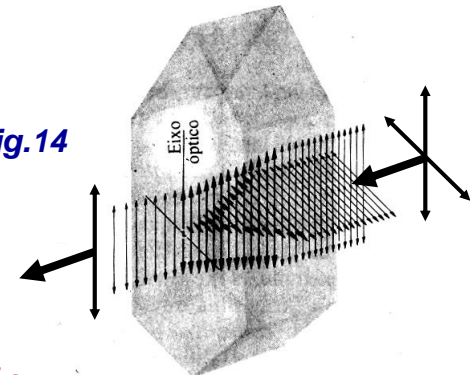


Fig.14



Nos cristais dicróicos o eixo óptico é o eixo de transmissão

ÓTICA ONDULATÓRIA

5. Polarização – Dicroísmo

- **Grelhas de fios condutores paralelos** – nestas grelhas o eixo de transmissão é perpendicular aos fios. São adequadas (fáceis de construir) para polarizar micro-ondas (o espaçamento entre os fios deve ser da ordem de grandeza do c.d.o. da radiação). Para luz visível a grelha teria que ter qualquer coisa como 2200 fios/mm !!!

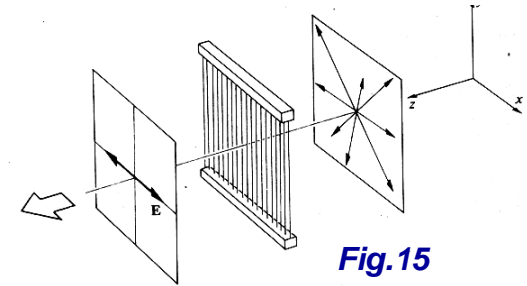


Fig.15

- **Polaroides** – em **1928** Edwin Herbert **Land** inventou o primeiro polarizador, filme dicroico ou polaroide, com base numa substância dicroica sintética, a **herapatite**. O filme é formado por cristais com a forma de agulhas, alinhados paralelamente entre si ou por meio de campos elétricos ou magnéticos, ou alinhados mecanicamente fazendo passar uma solução muito viscosa de herapatite por uma fenda estreita.

Em **1938** **Land** apresentou outra versão de um polaroide, hoje muito vulgarizada, que não se baseia em cristais de herapatite, mas em que apenas **se distende**, por aquecimento, **uma folha de álcool polivinílico**, alinhando assim as longas moléculas dos hidrocarbonetos. Esta folha é então colocada numa **solução de iodo** para a tornar condutora. Estes polaroides são uma **versão molecular das grelhas metálicas**. **A componente do campo elétrico perpendicular ao alinhamento das moléculas é transmitida e a componente paralela ao alinhamento é absorvida. O eixo de transmissão do polarizador é perpendicular à direção em que o filme foi distendido.**

ÓTICA ONDULATÓRIA

5. Polarização – Dicroísmo

Chama-se **eixo de transmissão do polarizador** à direção segundo a qual o polarizador é “transparente” ao campo elétrico. Só a componente do campo elétrico paralela ao eixo de transmissão passa através do polarizador.

Considere-se a situação representada na fig.16 em que radiação natural, não polarizada, de intensidade I_0 , a propagar-se ao longo do eixo dos z, incide sobre um polarizador. Se rodarmos o polarizador em torno do eixo dos z, a intensidade da radiação detetada (por exemplo por uma célula fotoelétrica) não se altera com o ângulo de rotação do polarizador. Qualquer que seja a posição do polarizador a intensidade detetada será sempre $I = I_0/2$ (para radiação incidente não polarizada)

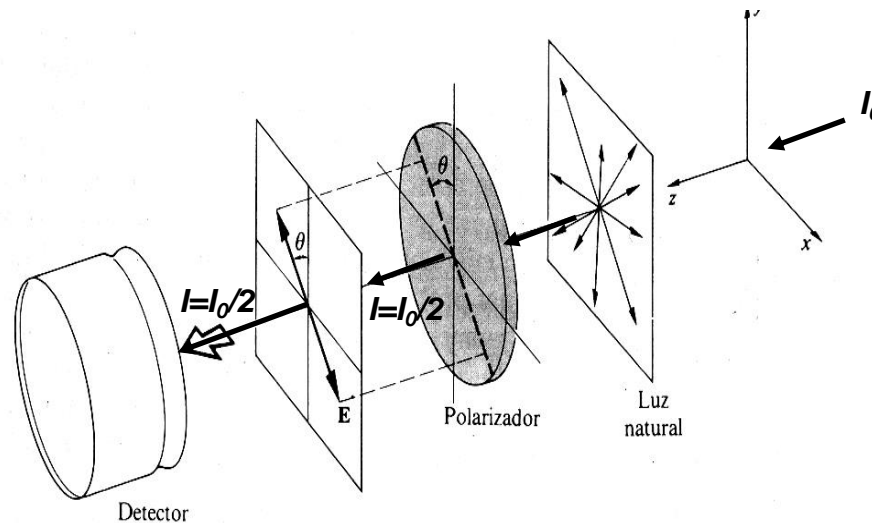


Fig.16

ÓTICA ONDULATÓRIA

5. Polarização – Lei de Malus

Introduza-se agora um **segundo polarizador** idêntico ao primeiro, a que normalmente se chama **analisador**.

Na situação representada na fig.17 o eixo de transmissão do analisador faz um ângulo de θ com o eixo de transmissão do primeiro polarizador. Seja E_1 a amplitude do campo elétrico incidente no analisador. Só a componente do campo elétrico paralela ao eixo de transmissão do analisador é que passa através deste, ou seja apenas uma amplitude $E_1 \cos \theta$ atinge o detetor. Em termos de **irradiância**, aquilo que realmente se deteta, tem-se $I_2 = I_1 \cos^2 \theta$. Esta é a chamada **Lei de Malus, publicada em 1809 por Étienne Malus**, capitão do exército de Napoleão. Note-se que, quando $\theta = 90^\circ$, a intensidade transmitida pelo analisador se anula.

Quando os eixos de transmissão dos dois polarizadores fazem entre si um ângulo de 90° , diz-se que os polarizadores estão cruzados.

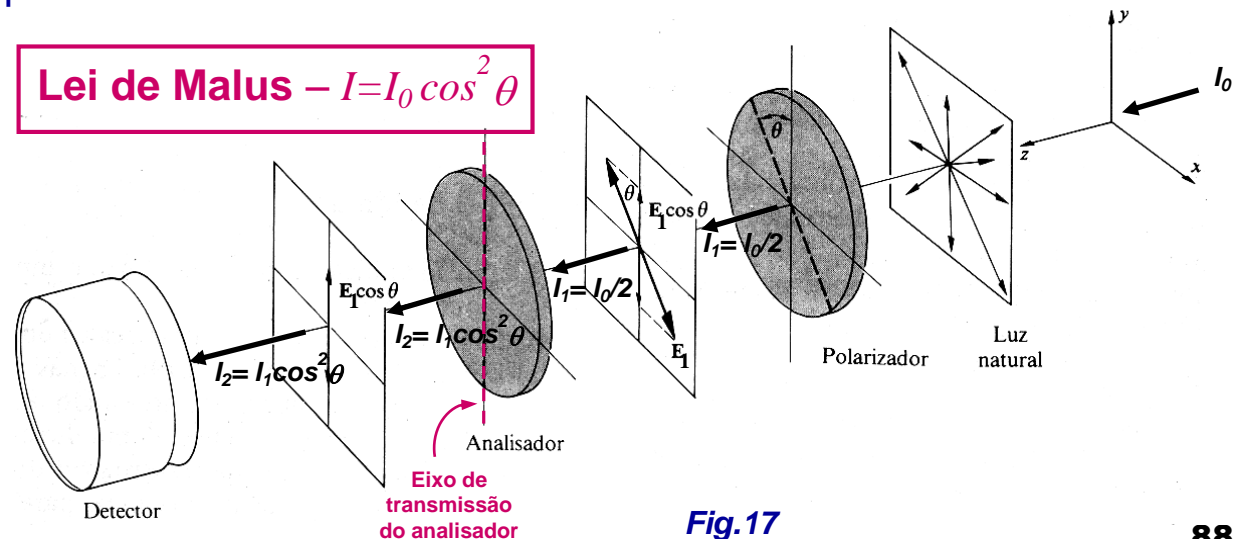


Fig.17

ÓTICA ONDULATÓRIA

5. Polarização – Reflexão

➤ (2) – Polarização por reflexão – um dos processos mais simples de obter luz polarizada é por reflexão numa interface transparente. Este efeito foi estudado pela primeira vez por Étienne **Malus em 1808**, antes da dedução das equações de Maxwell e das equações de Fresnel, embora seja uma consequência delas.

Já vimos, pelas **equações de Fresnel**, que $r_{\parallel} = 0$ quando $\theta_i + \theta_t = 90^\circ$. Para este ângulo θ_i particular, designado por **ângulo de polarização** ou **ângulo de Brewster**, a radiação refletida é então totalmente polarizada perpendicularmente ao plano de incidência (David **Brewster**, em 1812, anos antes da dedução das equações de Fresnel).

Facilmente mostra-se que **Lei de Brewster**

$$\tan \theta_p = \frac{n_t}{n_i}$$

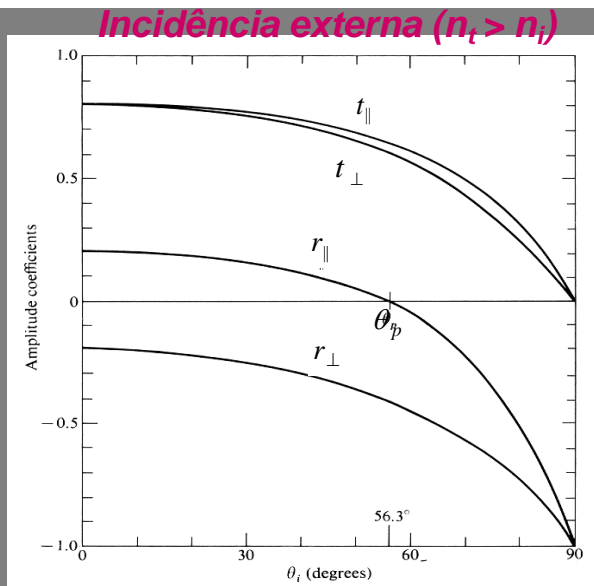


Fig.6

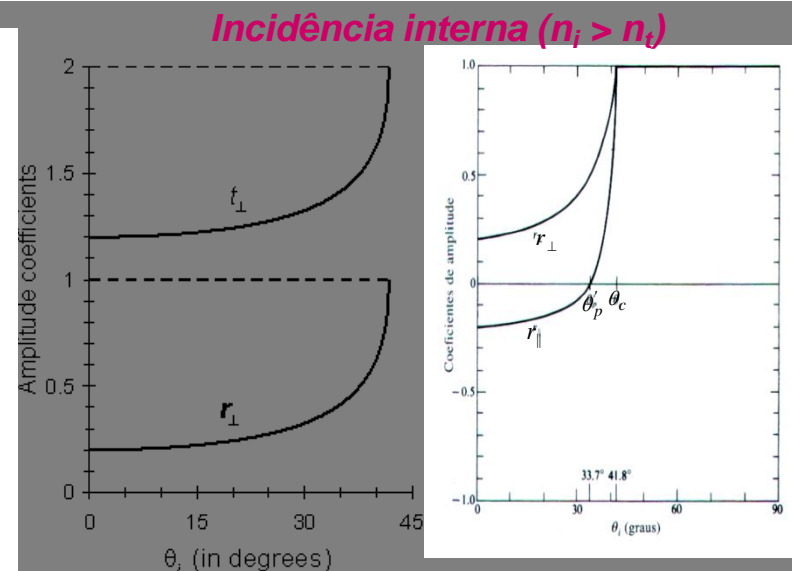


Fig.7

ÓTICA ONDULATÓRIA

5. Polarização – Reflexão

Pelas **equações de Fresnel**, representadas nas figuras 6 e 7, sabemos que, se o campo elétrico estiver polarizado **perpendicularmente** ao plano de incidência, existe radiação refletida e refratada, como se mostra na fig.18-a), para qualquer θ_i se se tratar de reflexão externa e para qualquer $\theta_i < \theta_c$ se se tratar de reflexão interna. No entanto, se a polarização do campo elétrico for **paralela** ao plano de incidência, existe um ângulo, chamado **ângulo de polarização ou ângulo de Brewster**, em que não existe feixe refletido segundo essa direção.

Então, para um feixe de **radiação não polarizada** que incida na superfície de separação de dois meios transparentes segundo o **ângulo de polarização ou ângulo de Brewster**, verifica-se que o feixe refletido é totalmente polarizado na direção perpendicular ao plano de incidência. (fig.18-b).

A radiação incidente é não polarizada e a refletida é totalmente polarizada.

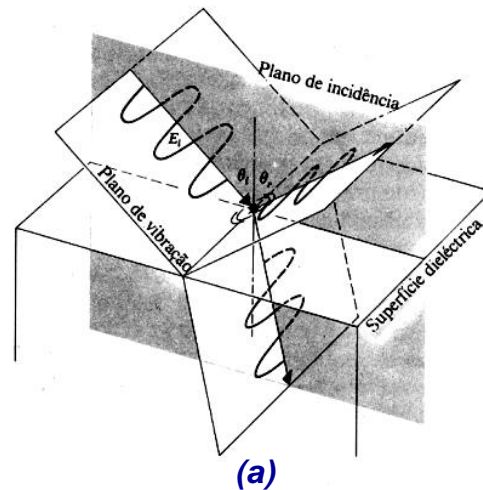
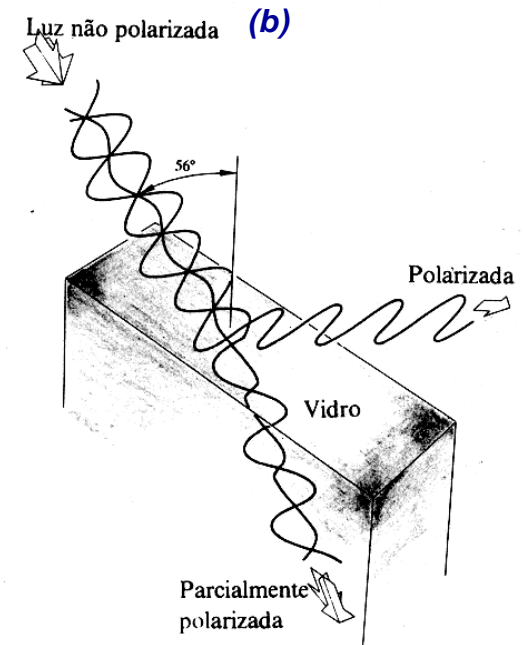


Fig.18



ÓTICA ONDULATÓRIA

5. Polarização – Reflexão

As **equações de Fresnel** definem os coeficientes de reflexão e de transmissão para as direções paralela e perpendicular ao plano de incidência. A partir deles obtém-se a refletância e a transmitância que se representam nas figuras juntas.

$$R_{\perp} = r_{\perp}^2; \quad T_{\perp} = \frac{n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i} t_{\perp}^2$$

$$R_{\parallel} = r_{\parallel}^2; \quad T_{\parallel} = \frac{n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i} t_{\parallel}^2$$

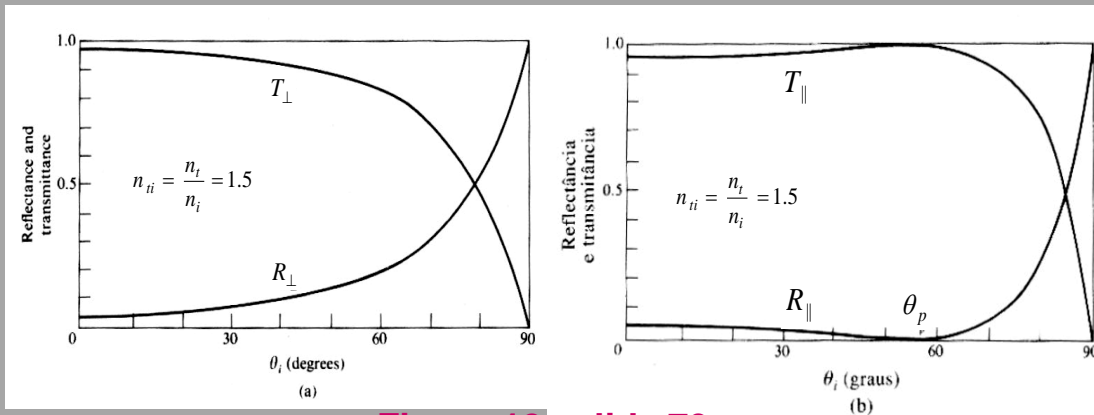
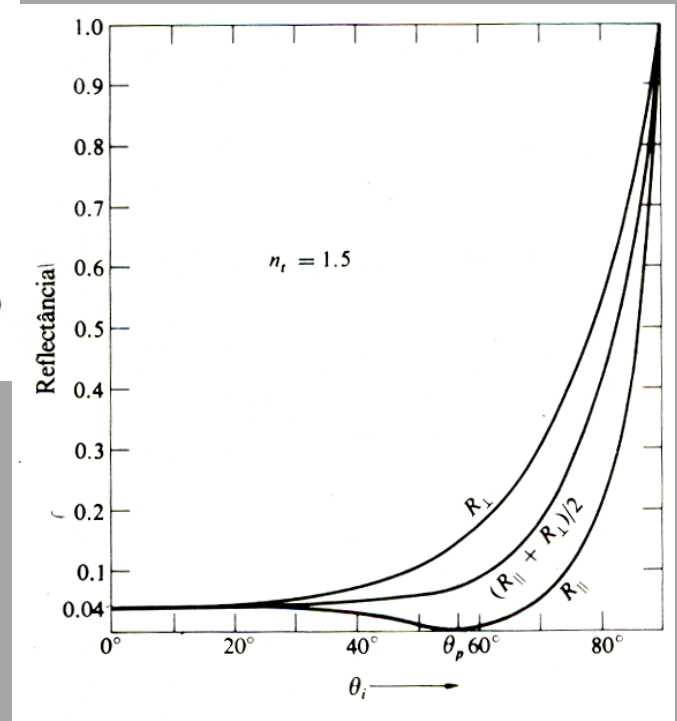


Figura 12 , slide 73

Como já se disse, se a radiação for **não polarizada** pode ser representada por duas componentes ortogonais, incoerentes, linearmente polarizadas e de igual amplitude. Logo será $I_{i\parallel} = I_{i\perp} = I_i/2$

Tem-se então

$$R = \frac{I_r}{I_i} = \frac{I_{r\parallel} + I_{r\perp}}{I_i} = \frac{I_{r\parallel}}{2I_{i\parallel}} + \frac{I_{r\perp}}{2I_{i\perp}} = \frac{R_{\parallel}}{2} + \frac{R_{\perp}}{2} = \frac{R_{\parallel} + R_{\perp}}{2}$$



ÓTICA ONDULATÓRIA

5. Polarização – Difusão

➤ (3) – Polarização por “scattering”(espalhamento) ou difusão – A difusão percebe-se facilmente encarando a radiação do ponto de vista **corpuscular**. Pode-se visualizar como um **choque elástico entre duas partículas em que uma delas é um fóton** e a outra é uma partícula de dimensões apropriadas. Em resultado do choque elástico o fóton é reemitido com a mesma energia numa direção aleatória, dando-se assim origem ao espalhamento da radiação. (Se o choque for inelástico o fóton será absorvido)

A difusão só se torna relevante quando as duas “partículas” que chocam têm **“dimensões” características semelhantes**. Para o fóton a dimensão característica é o seu comprimento de onda e para as partículas é o seu diâmetro.

Se as **partículas difusoras forem muito menores do que o c.d.o. da radiação** (se forem, por exemplo, moléculas, para a radiação visível) os fótons atravessam a solução sem, praticamente, serem desviados – **a difusão é desprezável**.

Se o **tamanho das partículas difusoras for da ordem de grandeza do comprimento de onda da radiação que incide sobre elas, aí a difusão torna-se importante**.

Para certas situações a difusão é dependente do comprimento de onda – quanto menor for o comprimento de onda da radiação visível, mais radiação é dispersa elasticamente. Esta dependência dá origem a efeitos coloridos muito interessantes.

ÓTICA ONDULATÓRIA

5. Polarização – Difusão

Como resultado do **choque elástico**, cada partícula segue, aproximadamente com a mesma energia, mas **variando a sua direção de propagação**. O resultado é um **espalhamento da REM no interior da solução** e uma consequente **diminuição da intensidade da radiação transmitida na direção do feixe incidente**.

Quando as partículas difusoras têm tamanhos da ordem de grandeza, mas inferiores, ao c.d.o. da radiação que interage com elas, está-se no domínio da **difusão de Rayleigh**.

A **difusão de Rayleigh** é particularmente importante porque é responsável por alguns dos mais belos e coloridos efeitos na Natureza – a **cor azul do céu** e a **cor avermelhada do pôr do Sol**.

Estes belos efeitos coloridos associados à **difusão Rayleigh** resultam da sua selectividade relativamente ao c.d.o. da radiação incidente – verifica-se que **a intensidade da radiação difundida é inversamente proporcional à quarta potência do c.d.o.**

$$I_{dif} \propto \frac{1}{\lambda^4}$$

Como consequência, na zona do visível, os menores c.d.o., os azuis, são cerca de 10 vezes mais difundidos que os vermelhos, ou seja, por cada fóton vermelho difundido, são difundidos cerca de 10 fótons azuis ... como se mostra na figura seguinte.

ÓTICA ONDULATÓRIA

5. Polarização – Difusão

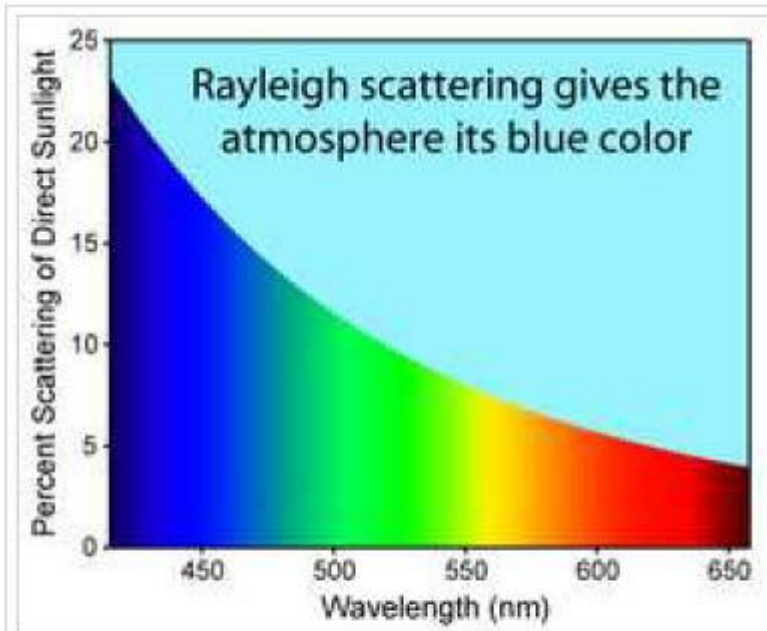


Figure showing the more intense scattering of blue light by the atmosphere relative to red light.

A **luz do Sol**, luz branca, ao atravessar a atmosfera terrestre encontra partículas difusoras que provocam **difusão de Rayleigh**.

Assim, numa manhã clara, em que a **atmosfera está límpida** (com poucas partículas difusoras), a intensidade da radiação difundida é pequena e predominantemente na zona dos azuis. **O céu apresenta-se então azul** e o **disco solar é muito intenso e de cor branca ou de um amarelo muito claro**.

À medida que vai havendo cada vez **mais partículas difusoras na atmosfera** (poluição ou vapor de água) a intensidade da radiação solar que é difundida aumenta e são agora difundidos não só os azuis, mas também os verdes, os amarelos, os laranjas...

ÓTICA ONDULATÓRIA

5. Polarização – Difusão

O céu tem agora o aspecto pálido e esbranquiçado típico de uma cidade poluída. A intensidade do sol é agora muito menor, porque só conseguimos ver a radiação que não foi difundida (coada) pela atmosfera. É normal nestas circunstâncias **o Sol apresentar-se cor de fogo**, resultado de só este extremo vermelho do espectro da luz branca não ter sido difundido. Se a difusão for ainda maior o céu fica completamente branco. Toda a radiação proveniente do Sol foi difundida na atmosfera e não se vê sequer o disco solar.

Ao fim do dia é também habitual ver-se um **pôr do sol intensamente vermelho**. Nesta altura do dia a atmosfera está, normalmente, mais poluída, e para além disso o Sol está muito baixo no horizonte sendo assim muito maior a camada de atmosfera atravessada.

Como seria então o céu se não existisse atmosfera?

ÓTICA ONDULATÓRIA

5. Polarização – Difusão

Para além destes efeitos coloridos associados à difusão de Rayleigh, não podemos esquecer, **a nível microscópico**, o que acontece quando a **REM interage com uma partícula (um dipolo) e a põe a oscilar**. A direção da oscilação induzida pela radiação na partícula é paralela à direção do campo elétrico que a provocou.

Nas figuras juntas vê-se radiação linearmente polarizada a “chocar” com uma partícula, identificando-se as possíveis direcções de oscilação do campo elétrico depois do choque. Como se vê **só não existe radiação difundida ao longo do eixo do dipolo**.

O modelo dipolar elétrico da radiação prevê que os campos elétrico e magnético estejam sempre orientados num plano perpendicular ao eixo do dipolo.

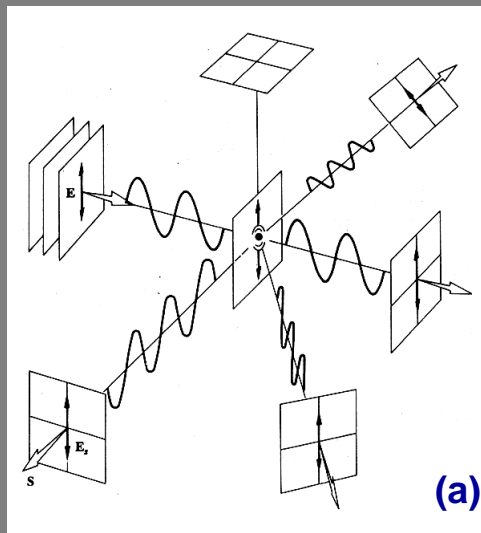
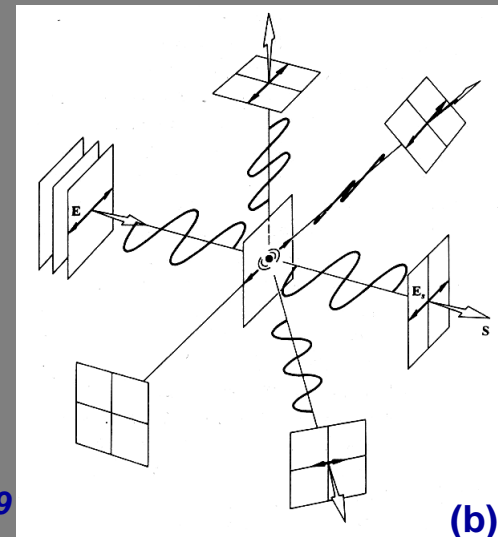


Fig.19



ÓTICA ONDULATÓRIA

5. Polarização – Difusão

Se a radiação que incide nas partículas difusoras **não é polarizada**, pode-se representar, como já se disse, pela sobreposição de dois estados de polarização linear, ortogonais, incoerentes e com a mesma amplitude, como se ilustra na figura 20.

O resultado será a sobreposição dos resultados que se mostram na figura 19.

A **radiação difundida é não polarizada na direção frontal**. Em **todas as outras direções é parcialmente polarizada**, sendo tanto mais polarizada quanto maior for o ângulo entre a direção de observação e a direção de incidência.

Observando a **90° relativamente à direção de incidência** a radiação difundida é **linearmente polarizada, com direções de polarização ortogonais**, como se mostra na figura 20.

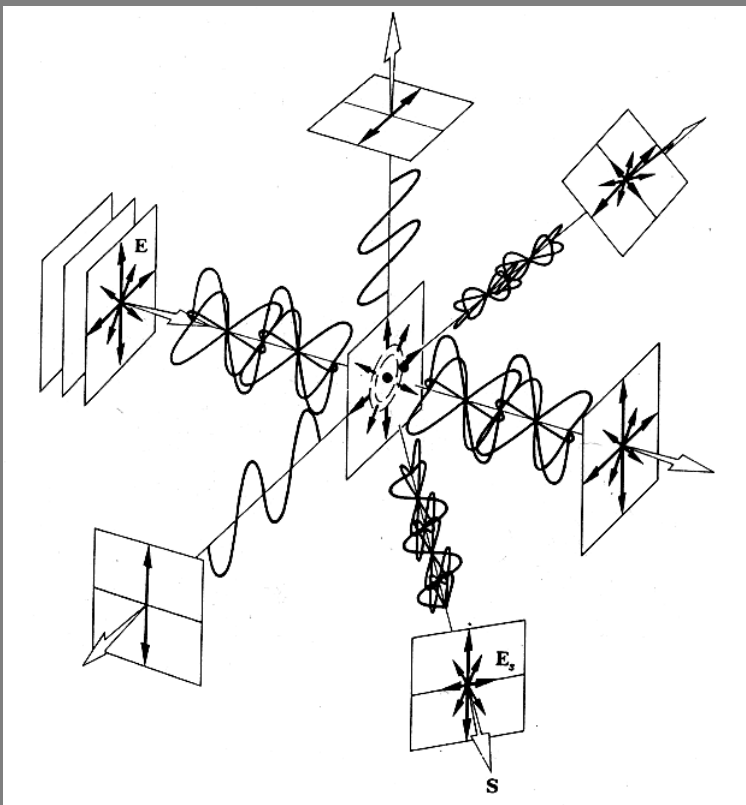


Fig.20

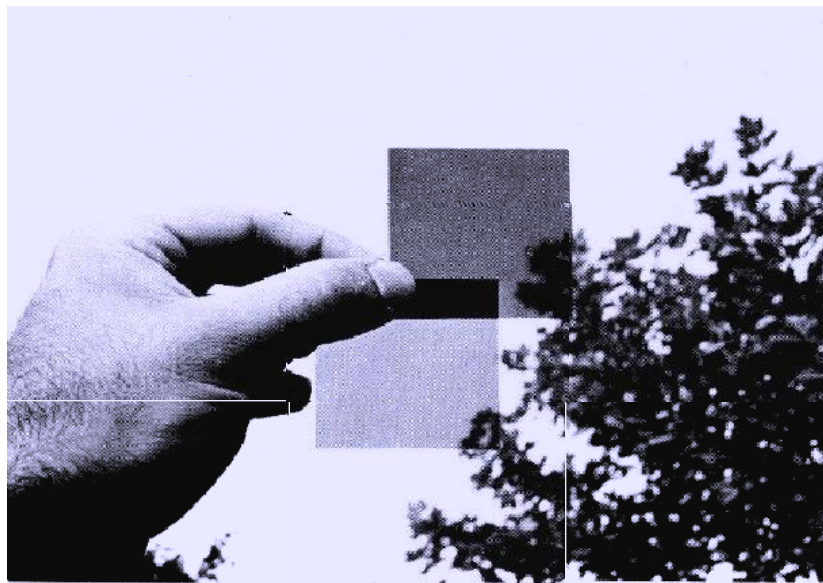
ÓTICA ONDULATÓRIA

5. Polarização – Difusão

Como já se disse a cor azul do céu resulta de difusões múltiplas da radiação solar nos centros difusores que se encontram na atmosfera.

Então, se estivermos a observar o céu aproximadamente na perpendicular em relação aos raios solares, a luz difundida na atmosfera deve ser polarizada, essencialmente na direção vertical.

Na figura veêm-se dois polarizadores cruzados estando o de cima muito mais escuro do que o de baixo. O polarizador de cima está a deixar passar a radiação polarizada na horizontal, que é pouca, enquanto que o de baixo está a deixar passar a radiação polarizada na vertical, que é a maioria.



ÓTICA ONDULATÓRIA

5. Polarização – Birrefringência

➤ (4) – Polarização por birrefringência ou dupla refração – Tal como nos cristais dicróicos, também os **cristais birrefringentes** apresentam algum tipo de anisotropia nas propriedades óticas que nos permitem observar efeitos interessantes nomeadamente em relação aos estados de polarização da radiação que os atravessa. Os cristais dicróicos são apenas um caso particular do caso mais geral dos cristais birrefringentes.

Apenas os **materiais amorfos** ou os **cristais de rede cúbica são isotrópicos**. Todas as outras redes cristalinas apresentam anisotropia ótica.

Temos de distinguir **dois tipos de cristais anisotrópicos, os uniaxiais e os biaxiais**.

Os **cristais uniaxiais** são cristais em que é possível identificar uma direção particular, chamada **eixo óptico (EO)**. A direção do EO é identificada a partir da direção de clivagem destes cristais. **Cristais anisotrópicos uniaxiais são cristais com redes cristalinas hexagonais, tetragonais ou trigonais**.

Cristais com redes cristalinas mais complexas, do tipo **ortorrômbico, monoclinico e triclinico**, são **anisotrópicos biaxiais**, onde é possível identificar dois eixos ópticos.

A polarização por dupla refração ocorre nos cristais uniaxiais e é só a estes que nos vamos referir brevemente.

ÓTICA ONDULATÓRIA

5. Polarização – Birrefringência ou dupla refração

Nos **cristais uniaxiais**, como já se disse, pode-se identificar uma direção particular, a direção do **eixo óptico**, segundo a qual o cristal se comporta como se fosse isotrópico. Se a REM incidir paralelamente ao EO (\vec{E}_{\perp} ao EO) não se manifesta anisotropia no cristal.

Se a REM incidir perpendicularmente (\vec{E}_{\parallel}) a uma direção chamada **secção principal do cristal**, que se relaciona com a direção de clivagem e com a direção do EO, ela vai-se dividir em dois feixes paralelos, que se propagam no interior do cristal com duas velocidades diferentes, ou seja, **existem dois valores diferentes de índice de refração**, e por isso **duas refrações**. É exactamente por apresentarem **duas refrações**, que chamamos, aos **cristais uniaxiais**, **cristais birrefringentes** (antigamente utilizava-se o termo **refringência** em vez de **refração**).

Um **cristal birrefringente típico e muito vulgar é a calcite** ou carbonato de cálcio, CaCO_3 .

Na figura junta observa-se bem a **dupla refração na calcite**.

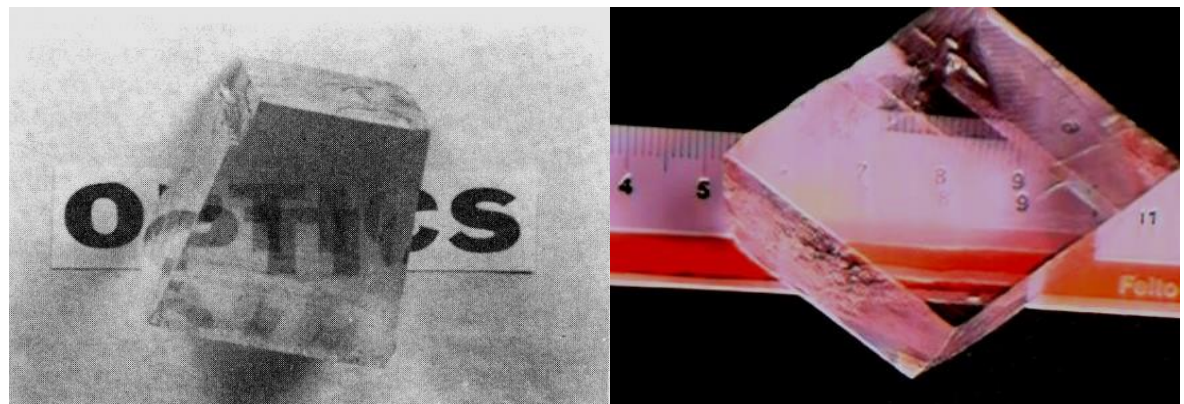


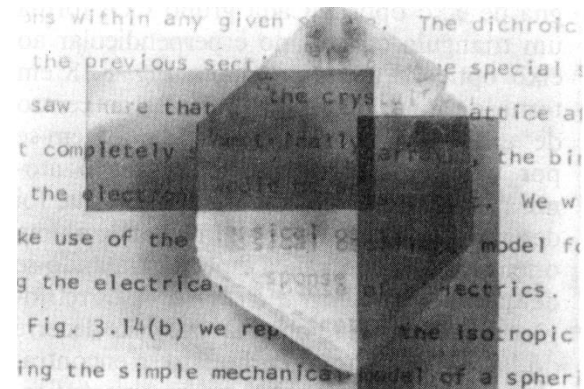
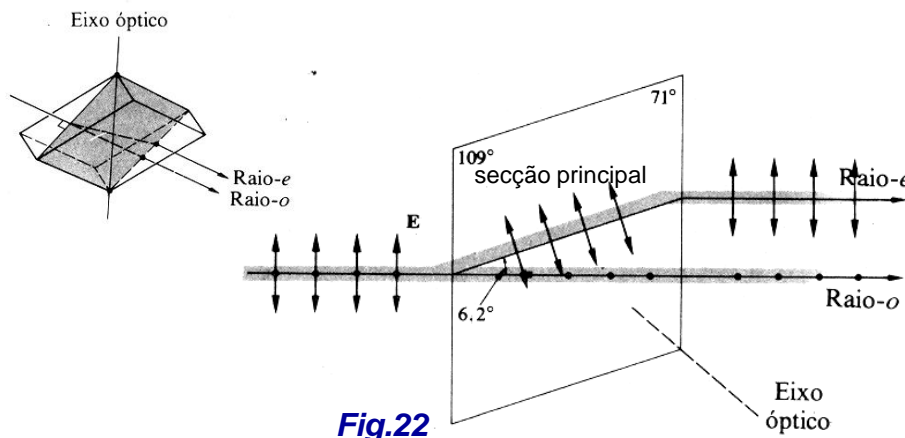
Fig.21

ÓTICA ONDULATÓRIA

5. Polarização – Birrefringência ou dupla refração

Os **dois feixes em que a radiação se divide** no interior do cristal são paralelos entre si, mas desviados um em relação ao outro e com polarizações diferentes.

Chama-se a um, ao que não é desviado, o **raio ordinário com índice de refração ordinário n_o** , e ao outro o **raio extraordinário com índice de refração n_e** . O **desvio entre os dois raios depende da diferença entre n_o e n_e e do tamanho do cristal**. Por exemplo na calcite, para $\lambda = 589.3 \text{ nm}$, $n_o = 1.6584$ e $n_e = 1.4864$. Se o cristal rodar o raio extraordinário roda também no espaço, ficando o ordinário fixo. Esta situação mostra-se na fig.22: o feixe incidente é não polarizado e os feixes refractados têm polarizações ortogonais, isto é a polarização do feixe ordinário é perpendicular à do feixe extraordinário. A fig.23 ilustra bem os dois estados de polarização, perpendiculares entre si, associados às duas imagens observadas através dum cristal de calcite.



ÓTICA ONDULATÓRIA

5. Polarização – Birrefringência ou dupla refração

Situações de **birrefringência** podem-se também observar em certos **plásticos sob tensão**, verificando-se que o eixo óptico efectivo se encontra na direcção da tensão aplicada. Este efeito, que consiste em transformar substâncias isotrópicas em substâncias anisotrópicas por processos mecânicos, chama-se **birrefringência mecânica ou fotoelasticidade**.

A **fotoelasticidade** é a base de uma técnica bastante comum para **estudar tensões em estruturas mecânicas**. As tensões podem ser postas facilmente em evidência observando a estrutura entre polarizadores cruzados, como se mostra na figura 24. Infelizmente esta figura não é a cores, mas os padrões resultantes das distribuições de tensões a que os materiais estão sujeitos, quando iluminados por luz branca e observados entre polarizadores cruzados, mostram um conjunto de cores interferenciais muito típico (franjas coloridas) a que se sobrepõem algumas zonas escuras.

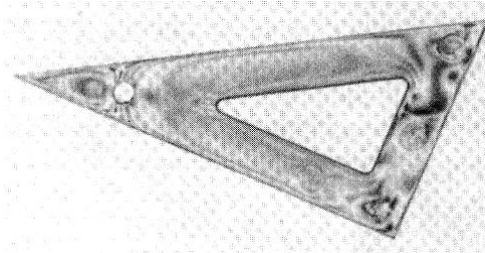
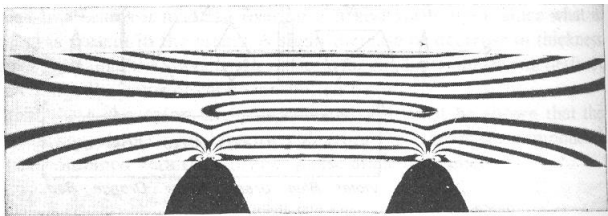
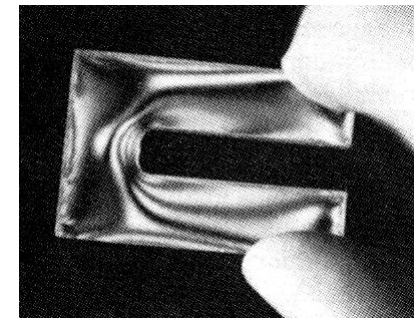


Fig.24



ÓTICA ONDULATÓRIA

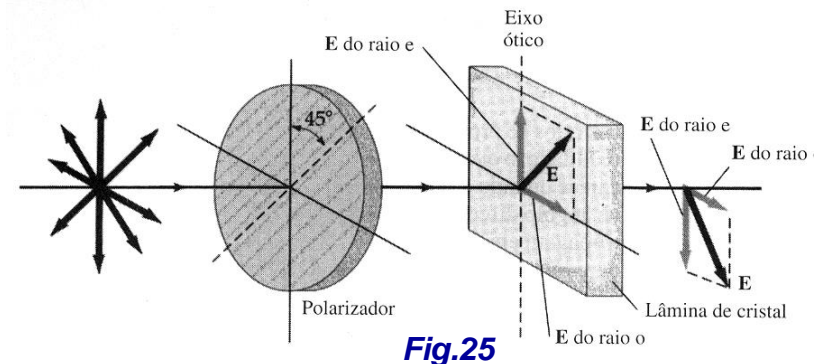
5. Polarização – Birrefringência ou dupla refração

Vejamos uma **aplicação muito útil dos cristais birrefringentes – alterar o estado de polarização de uma dada radiação.**

Considere-se uma **lâmina birrefringente**, em que um feixe de radiação monocromática e linearmente polarizada incide **perpendicularmente a uma secção principal** do cristal. Como já se sabe, os raios ordinário e extraordinário vão-se propagar, no interior do cristal, paralelamente um ao outro, mas desviados e com velocidades diferentes, logo com percursos ópticos diferentes. A **diferença de percurso óptico entre os dois feixes, diferença de fase, depende do comprimento de onda da radiação incidente e da espessura da lâmina birrefringente.**

Podemos imaginar que, para um dado c.d.o. possam existir **lâminas de quarto de onda, lâminas de meia onda e lâminas de onda completa**, em que os raios ordinário e extraordinário emirjam com uma diferença de fase de $\pi/2$, de π e de 2π , um em relação ao outro.

Na figura junta mostra-se o efeito de fazer passar um **feixe de radiação polarizada** por uma **lâmina de quarto de onda**. O campo elétrico da onda incidente faz um ângulo de 45° com o eixo óptico do cristal e o campo elétrico do feixe emergente está polarizado perpendicularmente ao feixe incidente.

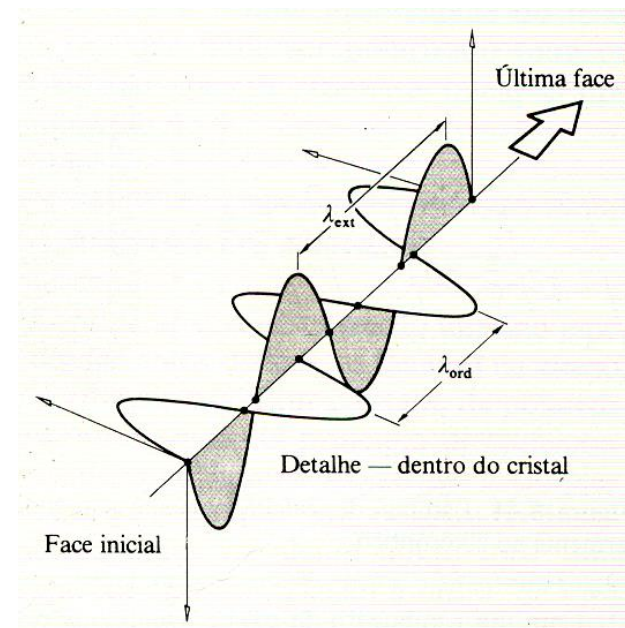
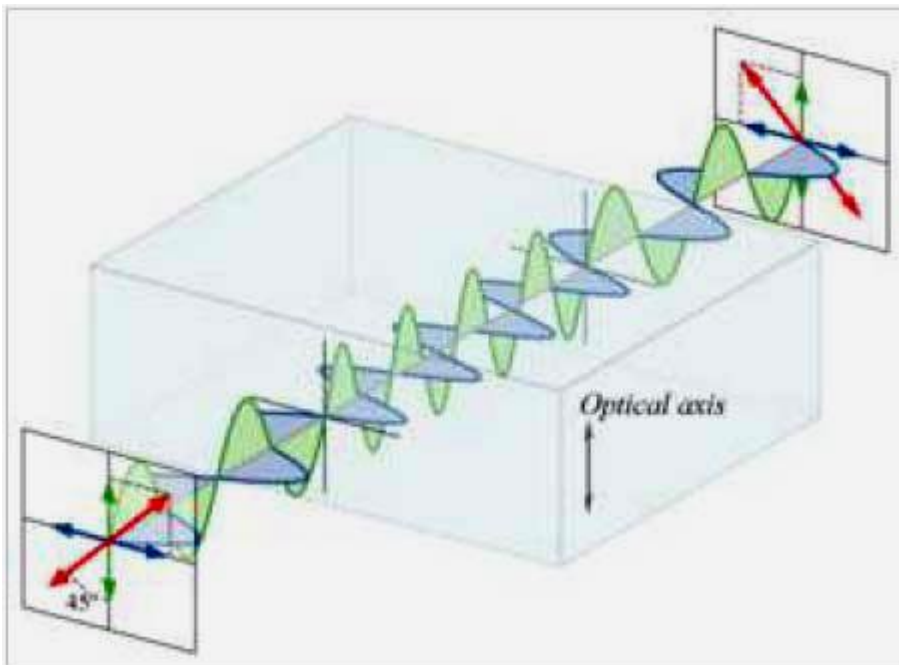


ÓTICA ONDULATÓRIA

5. Polarização – Birrefringência ou dupla refração

Para certas situações particulares de incidência (luz incidente polarizada segundo um ângulo de 45° com o eixo óptico da lâmina), **uma lâmina de quarto de onda altera de $\pi/2$ o estado de polarização da radiação incidente.**

Outras alterações ao estado de polarização da radiação incidente são possíveis considerando outras geometrias de incidência e/ou outras lâminas de atraso (outros materiais e/ou outras espessuras). É o caso da lâmina de meia onda da figura junta. De novo a radiação incidente está polarizada a 45° relativamente ao eixo óptico da lâmina



ÓTICA ONDULATÓRIA

5. Polarização – Birrefringência ou dupla refração

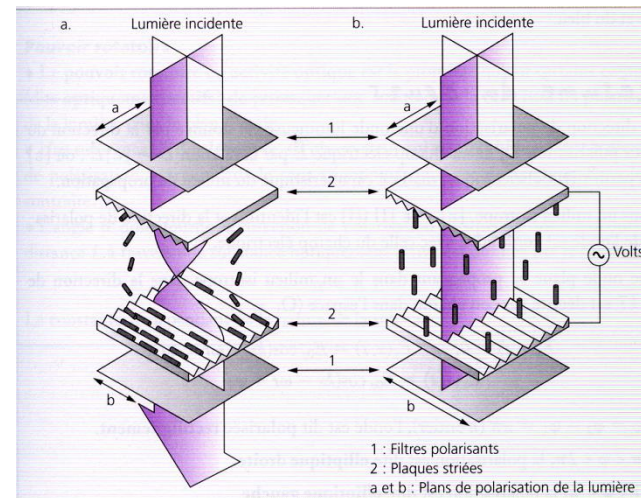
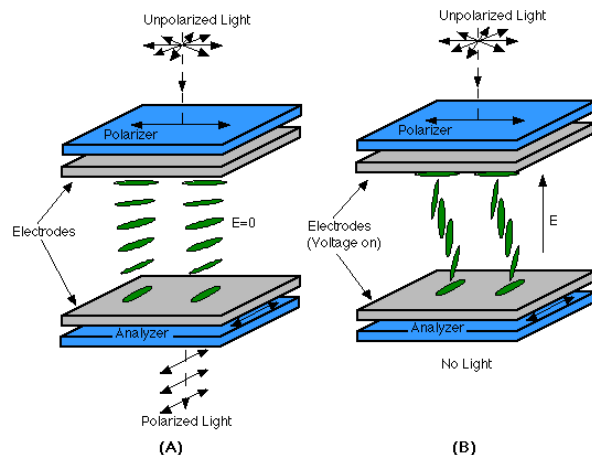
A **calcite é muito birrefringente** e, por isso, não é muito utilizada para construir lâminas de atraso porque, devido à grande diferença entre os valores de n_o e n_e , a espessura desta lâmina teria de ser muito pequena e a calcite é quebradiça e difícil de cortar em lâminas finas. O **quartzo e a mica** são os cristais mais utilizados no fabrico de lâminas de atraso. **Folhas polivinílicas sintéticas** são também muito comuns. São materiais anisotrópicos e birrefringentes, devido ao estiramento a que foram sujeitos para alinhar as cadeias poliméricas, embora não sejam cristalinos. Destes materiais o mais comum é o **celofane**.

A **birrefringência circular ou atividade ótica** é uma propriedade de algumas substâncias, cristais ou outro tipo de moléculas. Estas substâncias provocam a rotação do campo elétrico de um feixe de radiação polarizada. Esta rotação pode ser no sentido dos ponteiros do relógio, sentido direto ou dextrógiro, \mathcal{D} , ou no sentido contrário, sentido levógiro, \mathcal{L} . A atividade ótica está associada a moléculas que têm a possibilidade de ter isómeros (mesma fórmula molecular mas diferentes estruturas espaciais). Nas substâncias produzidas em laboratório existe igual quantidade do isómero dextrógiro e do levógiro, sendo o composto obtido opticamente inativo. No entanto, nas substâncias orgânicas naturais aparece só um dos isómeros – o açúcar é sempre dextrógiro e os aminoácidos são todos levógiros.

ÓTICA ONDULATÓRIA

5. Polarização – LCDs

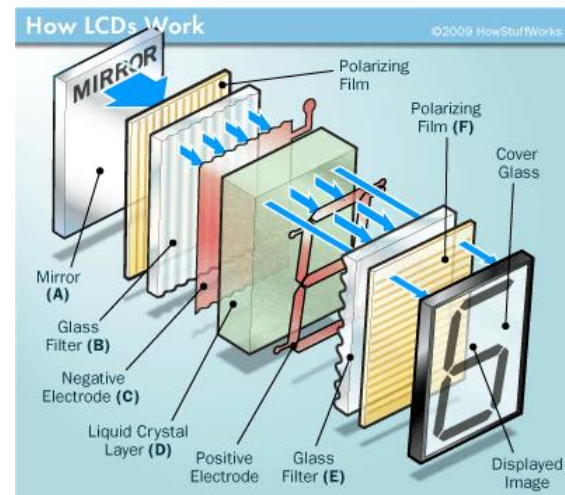
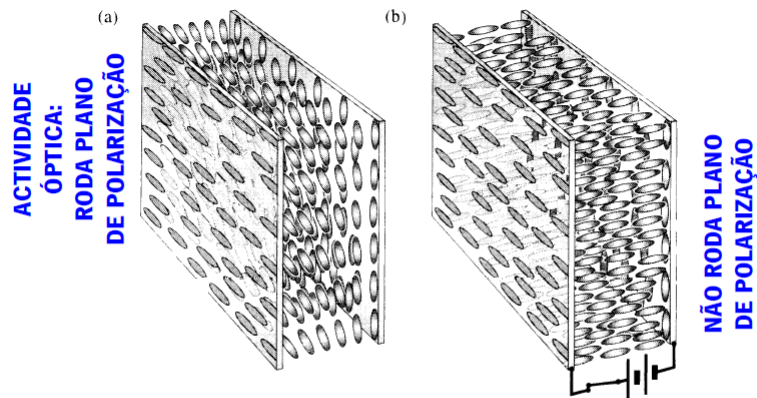
Os LCDs, Liquid Crystal Display, usam no seu processo de fabrico moléculas com propriedades especiais – os cristais líquidos (LC). Os LC são moléculas alongadas, birrefringentes e, normalmente, com atividade ótica. Colocam-se entre dois eléctrodos, um eléctrodo negativo, plano e uma grande quantidade de eléctrodos positivos, que podem corresponder a cada um dos *pixels* dum monitor. Os eléctrodos são colocados entre dois polarizadores cruzados. Os eléctrodos têm ranhuras em direcções perpendiculares obrigando as moléculas dos LC a alinharem-se paralelamente a elas. Entre os eléctrodos as moléculas rodam 90° formando uma hélice e o campo eléctrico roda também de 90° .



ÓTICA ONDULATÓRIA

5. Polarização – LCDs

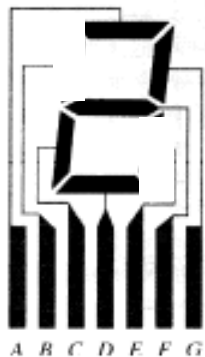
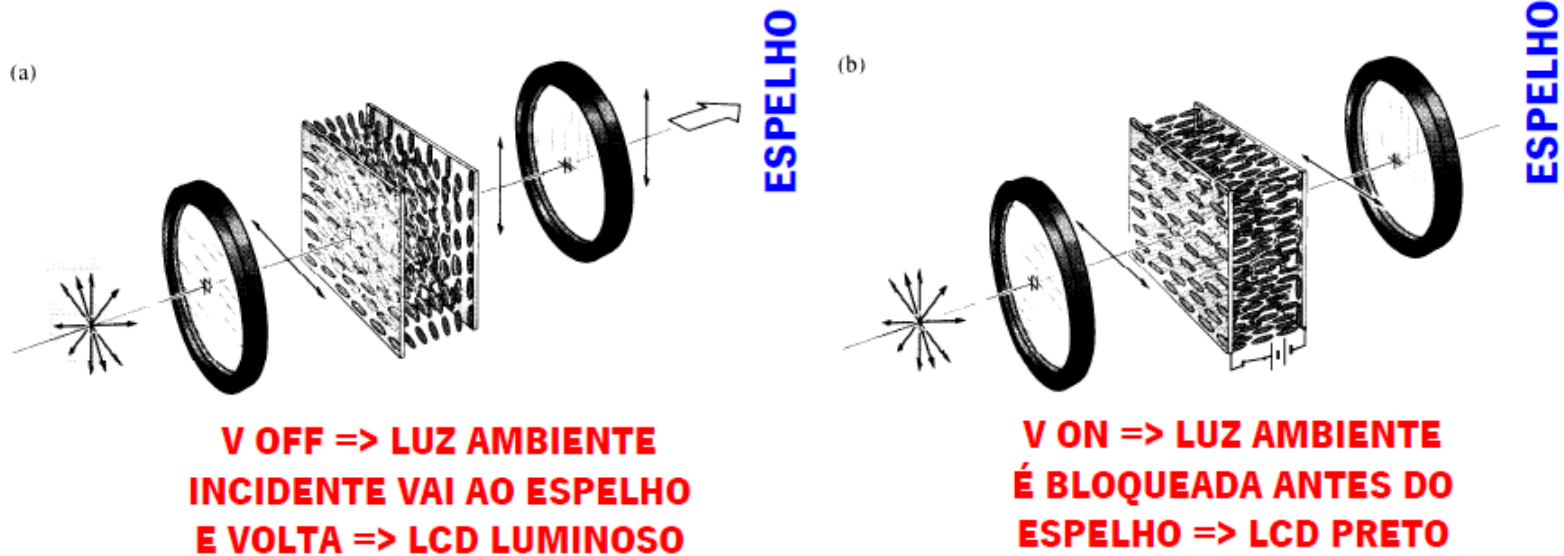
Quando se aplica uma diferença de potencial entre os dois eléctrodos as moléculas rodam e alinham-se paralelamente ao campo eléctrico. Sem campo eléctrico aplicado a geometria dos eléctrodos e a atividade ótica dos LC faz rodar de 90° o plano de polarização da radiação. Com o campo eléctrico aplicado a polarização não se altera.



É assim possível controlar, em cada *pixel*, a quantidade de luz que passa. Com o potencial aplicado a radiação é bloqueada e o *pixel* fica preto. Sem potencial aplicado a radiação de fundo passa e o pixel fica iluminado.

ÓTICA ONDULATÓRIA

5. Polarização – LCDs



Num display para mostrar números pode-se usar um conjunto de sete eléctrodos positivos tipo pequenas barras. Por exemplo, para formar o número 2 aplica-se uma diferença de potencial entre cada um destes eléctrodos, excepto o B e o F, e o eléctrodo negativo, aparecendo assim cinco barras pretas no display.