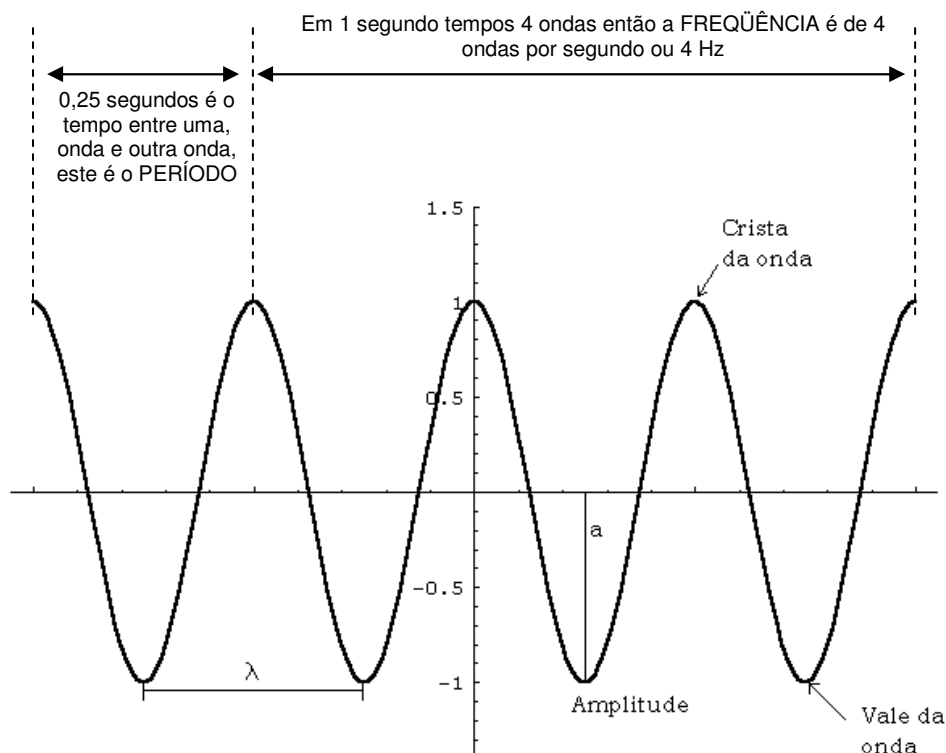


## MAIS UM POUCO SOBRE A NATUREZA ONDULATÓRIA DA LUZ (Interferência)

Para entender alguns tratamentos aplicados em lentes oftálmicas é necessário entender um pouco mais das propriedades da luz e sua natureza ondulatória.

Não é nosso objetivo nos aprofundarmos nas características das ondas, mas somente desenvolver os conceitos básicos para entender alguns fenômenos característicos da óptica.

Alguns fenômenos específicos observados como a *polarização*, anteriormente citada, é que permitiram caracterizar a luz como um fenômeno ondulatório, e classificá-la como uma *onda transversal*. Outra característica particularmente interessante das ondas é a possibilidade que têm de *interferir-se* mutuamente.

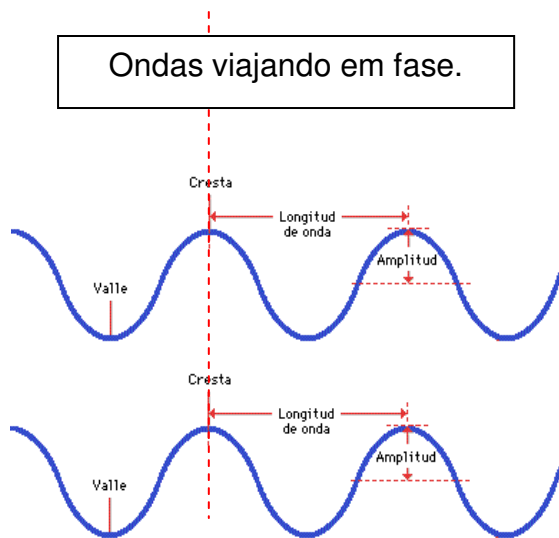


Como as ondas vão se formando em seqüência, normalmente verificamos a existência de um *trem de ondas* e algumas características devem ser destacadas. A altura da onda é denominada de *amplitude* e está relacionada como a intensidade do fenômeno ondulatório. O tempo transcorrido entre dois

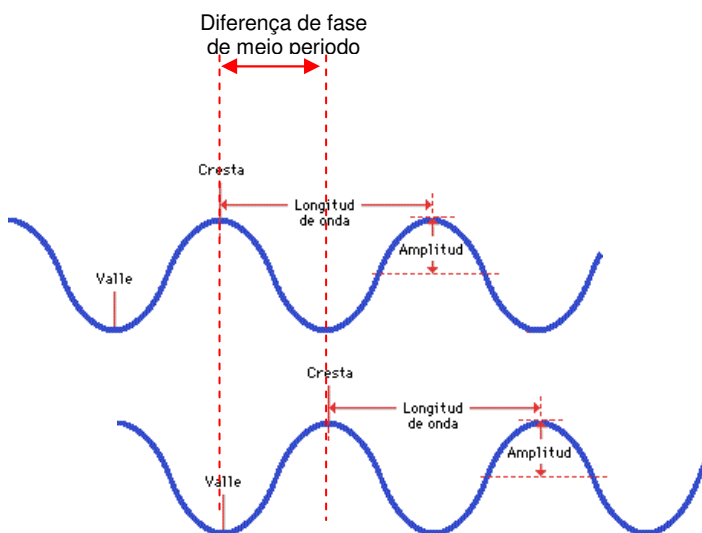
picos também é denominado de **ciclo** e o **período**, normalmente indicado pela letra “T”, é o tempo transcorrido entre a passagem de dois picos e a **freqüência**, indicada pela letra “f”, mostra quantos picos ocorrem numa determinada unidade de tempo, normalmente o segundo. A unidade de medida da freqüência é o Hertz (Hz), ou ciclos por segundo. Assim se dizemos que o período de uma onda é de 0,25 segundos então estamos afirmando que a cada 0,25 segundos verificamos a passagem de uma onda ou também podemos dizer que temos uma freqüência de 4 ondas por segundo ou 4 Hz.

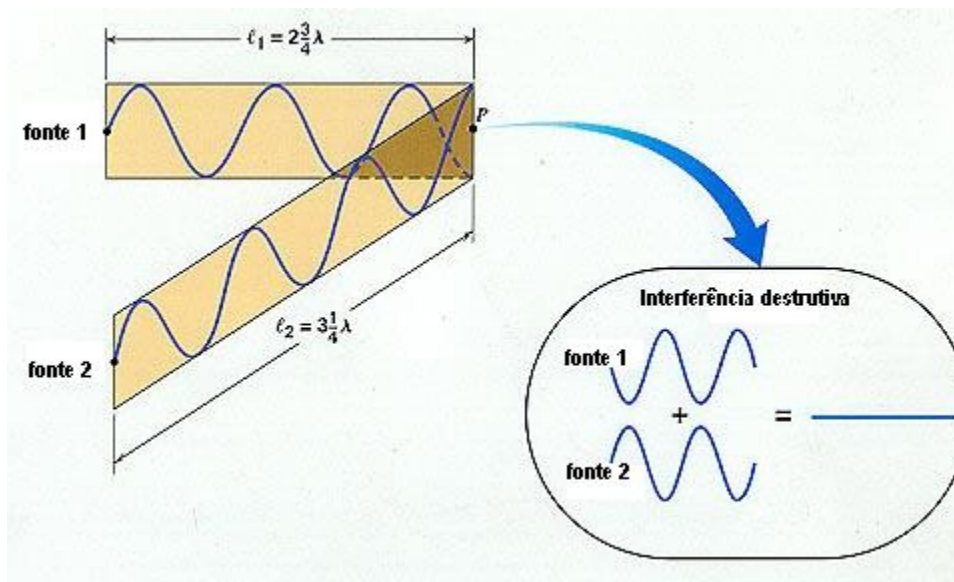
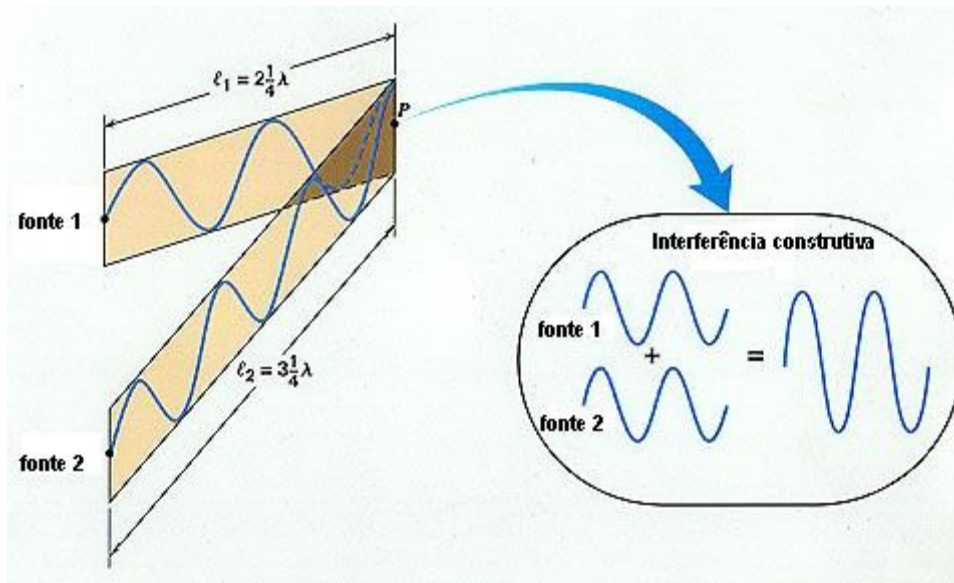
Outro conceito importante é denominado **fase**. Considerando duas ondas de mesmo período e comprimento de onda, viajando na mesma direção e sentido, onde seus picos acontecem ao mesmo tempo dizemos que estas duas ondas estão **em fase**, caso contrário e as cristas não coincidirem então dizemos que estão **fora de fase**.

O fenômeno da **interferência** ocorre quando duas ondas tentam ocupar o mesmo espaço. Se estas ondas



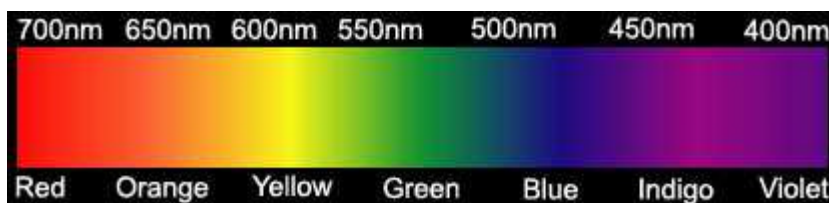
estiverem **em fase** elas se somarão e teremos o que chamamos de **interferência construtiva** e a amplitude da onda resultante será a soma da amplitude das ondas. Caso a fase corresponda exatamente a meio período teremos uma **interferência destrutiva** e as ondas se anularão mutuamente.





Figuras tiradas do site:

[http://educar.sc.usp.br/sam/cuba2/exp\\_6interferencia.html](http://educar.sc.usp.br/sam/cuba2/exp_6interferencia.html)



O fenômeno de interferência entre ondas explica o funcionamento de um tratamento muito utilizado atualmente nas lentes oftálmicas, que é o tratamento anti-reflexo, utilizado para melhorar a qualidade da correção oferecida por

estas lentes eliminando alguns reflexos incômodos para o usuário. Também é utilizado em espelhos especiais destinados a permitir o reflexo seletivo de partes do espectro visível.

Ao mudar de um meio transparente para outro, além de apresentar o fenômeno de refração, parte da luz é refletida de volta para o meio de incidência. A “fórmula” que permite calcular a quantidade de reflexo de cada superfície de uma lente é chamada Fórmula de Fresnel. Vamos utilizá-la para calcular o reflexo produzido por uma lente de índice de 1,9:

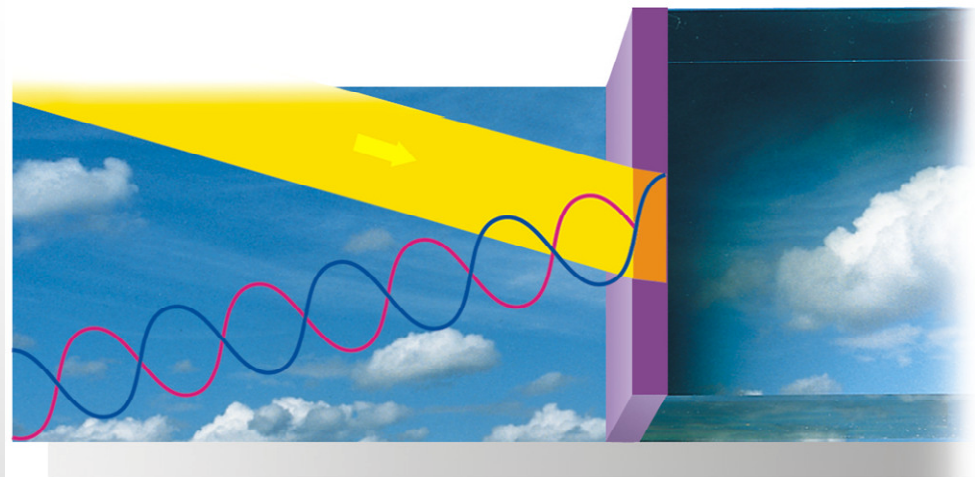
$$\rho = \left( \frac{n_{\text{lente}} - 1}{n_{\text{lente}} + 1} \right)^2 = \left( \frac{1,9 - 1}{1,9 + 1} \right)^2 \approx 0,09 = 9,6\%$$

Significa que cada lado da lente reflete quase 10% da luz! Então 20% da luz que poderia chegar ao olho do usuário são perdidos em reflexo! Já para o CR39 o reflexo é de apenas 4% por lado. Assim podemos perceber a importância do anti-reflexo.

Um dos fenômenos que se observa quando trabalhamos com filmes finos, películas transparentes muito finas é da **interferência destrutiva**. Considerando uma película muito fina de material transparente aplicado sobre a superfície de outro material transparente e se esta película tiver um índice de refração menor do que o índice do material base, verificamos que ocorrem dois reflexos: o primeiro no momento em a luz incide sobre a película e o segundo na interface entre a película e o material de base. Também observamos que estas duas ondas estão fora de fase e esta diferença dependerá da espessura da película. Fazendo com que a película tenha a espessura de exatamente um quarto do comprimento de onda da luz que incide sobre ela, verificaremos que o segundo reflexo ficará com uma diferença de fase de meio período, fazendo com que os picos dos segundo reflexo coincidam com os vales do primeiro reflexo, gerando uma **interferência destrutiva** entre as duas ondas.

Como existe a conservação de energia envolvida no processo, a energia que era perdida com o reflexo atravessa o material base aumentando a transmitância da lente.

Existe uma relação entre o índice de refração e o comprimento de onda que se mantêm constante na medida em que a luz atravessa os diversos meios transparentes esta relação é dada pela fórmula:  $\lambda_1 \cdot n_1 = \lambda_2 \cdot n_2$



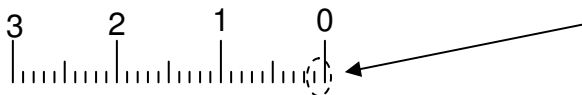
(Imagem retirada do site da Zeiss onde verificamos a ondas se interferindo e se cancelando)

Considerando a luz verde amarelada, cujo comprimento de onda é de 550 nm, escolhida pelo fato de a luz para o qual o olho humano tem maior sensibilidade vamos calcular a espessura da camada necessária para produzir o efeito de interferência destrutiva. Para isso precisamos calcular qual será o comprimento de onda da luz verde-amarelada dentro da película. O material que foi inicialmente utilizado é o Fluoreto de Magnésio ( $MgF_2$ ) cujo índice de refração é de 1,38 e  $n_1 = 1,0$  (índice de refração aproximado do ar).

Utilizando a relação anterior apresentada temos  $\lambda_1 \cdot n_1 = \lambda_2 \cdot n_2$ , então  
550. 1,0 =  $\lambda_2 \cdot 1,38$  daí  $\lambda_2 = 398,6$  nm, ou seja, a luz verde amarelada terá o comprimento de onda de 398,6 nm dentro da película. Como a película deverá ter um quarto do comprimento de onda para produzir o efeito desejado então teremos:

$$\text{Espessura de película} = \lambda_2/4 = 398,6/4 = 99,6 \text{ nanômetros.}$$

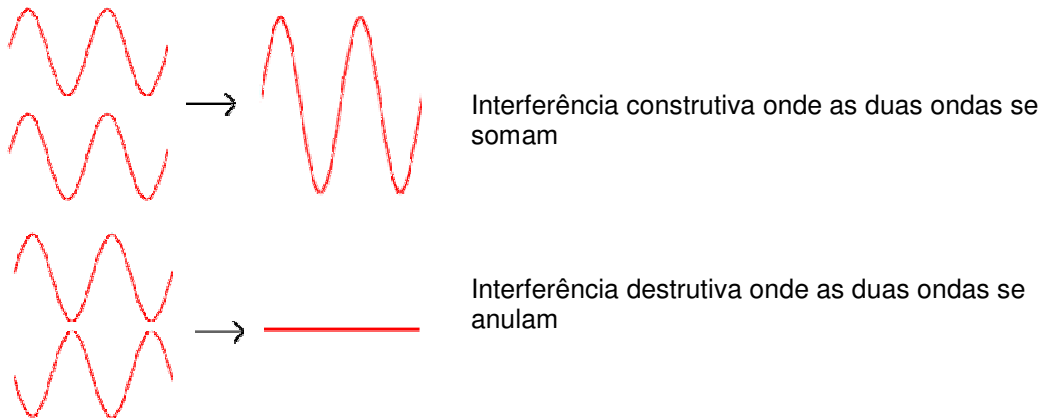
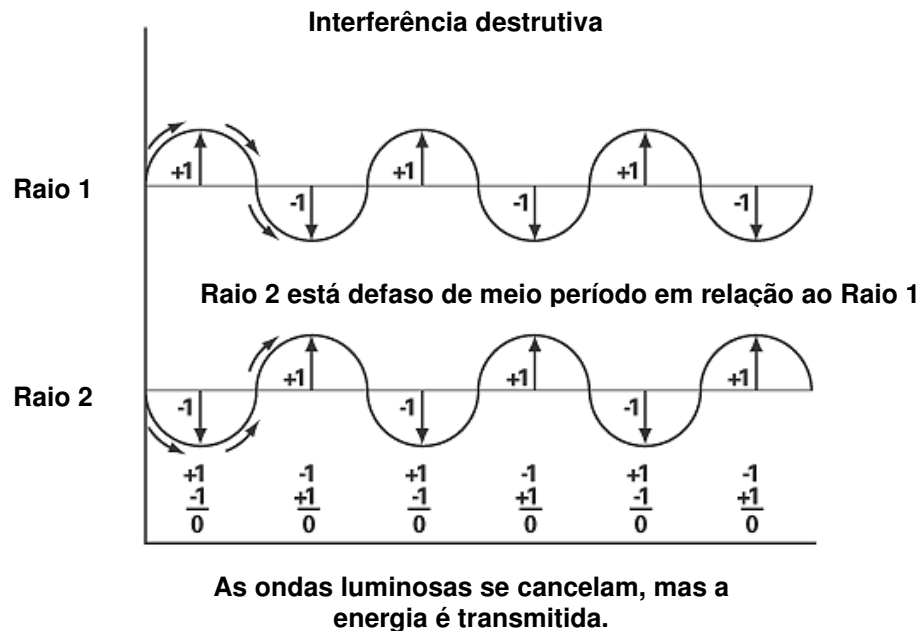
A espessura da película necessária para produzir a interferência desejada de será de 99,6 nanômetros, ou aproximadamente, 0,0001 mm. Cada camada de anti-reflexo é 1000 vezes mais fina que um fio de cabelo (considerando que um fio de cabelo tem aproximadamente 0,1mm). Você consegue imaginar isto? Pegar um milímetro daquela régua que usamos para medir a DP e dividi-lo em 10.000 partes?



Você imaginou em dividir um milímetro em 10.000

O anti-reflexo não é um filtro, ao contrário ele produz um aumento da quantidade de luz que passa através da lente, por causa da eliminação do reflexo. Também não filtra a radiação ultravioleta de forma significativa, pois se trata de uma camada muito fina. Se você quiser uma proteção maior contra o UV deverá fazer um tratamento adicional. Uma curiosidade sobre materiais que são utilizados como filtros é o *ouro* que, da mesma forma que o tratamento anti-reflexo é aplicado numa camada finíssima nos visores dos capacetes dos astronautas para filtrar a intensa luz solar, já que eles não contam com a proteção da atmosfera quando estão no espaço.





O advento do anti-reflexo possibilitou a utilização de materiais com índices de refração maiores, com maior conforto para o usuário. Índices de 1,9, que seriam tremendamente desconfortáveis sem ele.

As figuras a seguir ilustram a evolução do anti-reflexo, onde além das camadas representadas, este tipo de tratamento é composto de camadas adicionais cuja função é uma proteção adicional contra arranhões, poeira, água e oleosidade, além da aderência das camadas principais, e que também

formam os diferenciais de cada fabricante. A figura 1 representa uma lente sem o tratamento anti-reflexo. A luz branca, que é a formada por todas as cores, incide sobre a lente e todas são parcialmente refletidas de igual forma, com uma transmissão de 92%, no caso do CR39. Na figura 2 temos uma representação de um tratamento anti-reflexo mais simples, com menos camadas, onde a parte do reflexo correspondente à cor amarela é quase que totalmente eliminada aumentando a transmissão de luz, restando, porém o reflexo das demais cores, gerando um reflexo residual que é uma mistura das cores, numa tonalidade próxima do lilás (os números indicados são aproximados, somente para ilustrar). E finalmente, na figura 3, representamos um tratamento moderno com mais camadas, onde se consegue eliminar a quase totalidade do reflexo, sobrando uma pequena parcela, muito fraca, que corresponde à cor verde ou azul, dependendo do fabricante.

