

Introdução à Óptica Oftálmica

Observação: O presente texto é destinado a profissionais que necessitam somente das informações básicas relativas a alguns conceitos da óptica física que se aplicam à área de óptica oftálmica, por isso não existem grandes desenvolvimentos matemáticos ou outra forma de aprofundamento teórico.

Objetivo: Compreender conceitos básicos da natureza da luz e sua aplicação em alguns elementos na área de óptica oftálmica como filtros destinados a tratamentos terapêuticos, revestimentos anti-reflexo em lentes, filtros polarizadores e aplicação do conceito de frente de onda e difração.

Natureza da luz

Durante muito tempo os homens vêm procurando desvendar os mistérios relativos à luz. Do que a luz é feita? Como e por que se comporta de maneira característica? Como podemos usá-la?

Diversos estudiosos desenvolveram teorias para explicar a natureza da luz ao longo dos séculos. Assim criaram diversos modelos de forma a tentar prever e entender seu comportamento.

Desenvolver um modelo significa propor um conjunto de conceitos que nos permitam descrever um fenômeno, sendo muitas vezes necessário o desenvolvimento de símbolos que permita uma visualização através do estabelecimento de comparações com elementos da natureza que possuem comportamento semelhante e são mais concretos. Entender o comportamento da luz exige um pouco da nossa imaginação!

O físico holandês Christiaan Huygens (1629 -1695) descreveu a luz como uma onda, semelhante às ondas que se propagam na água, enquanto de Isaac Newton (1642 – 1727) tentava explicar luz com se fosse composta de pequenas partículas, conceito que prevaleceu por quase um século.

Posteriormente no século XIX Thomas Young e Augustin Fresnel, através de

alguns experimentos trouxeram de volta a proposta de Huygens, porém mais detalhada e embasada em novos conceitos. Finalmente com James Clerk Maxwell e Heinrich Rudolf Hertz estabeleceu-se a relação da luz com a eletricidade e o magnetismo, caracterizando a luz como uma onda eletromagnética.

Porém no início do século XX com a observou-se fenômenos, como o efeito fotoelétrico, de ordem microscópica, onde determinados matérias ao serem bombardeados pela luz emitem elétrons e que não podiam ser explicados através do entendimento da luz com uma onda, voltando então ao desenvolvimento do conceito de partícula, porém trazendo conceitos relativos ao modelo ondulatório como a frequência.

Assim atualmente os estudiosos do assunto consideram a natureza dupla da luz, onde, para determinados fenômenos o modelo de onda ou ondulatório oferece melhores explicações e o modelo de partícula que em outros casos, normalmente a nível microscópico, explicar melhor.

Assim se quisermos definir a luz simplesmente como um fenômeno físico referente a ondas eletromagnéticas ou fótons ou, numa forma mais lúdica, como a “sensação consciente de um observador cuja retina é atingida por ondas eletromagnéticas ou fótons” (Sears, 1961) ou como a “modalidade de energia radiante da qual um observador se apercebe mediante sensações visuais que provêm do estímulo da retina” (Optical Society of America).

Eletricidade e Magnetismo

A luz é têm mesma natureza que a eletricidade e o magnetismo, que são elementos básicos da natureza. A eletricidade já conhecida através dos raios e relâmpagos na natureza, foi observada quando um filósofo grego chamado Tales de Mileto percebeu que ao esfregar um pedaço de lã de carneiro em uma pedra de



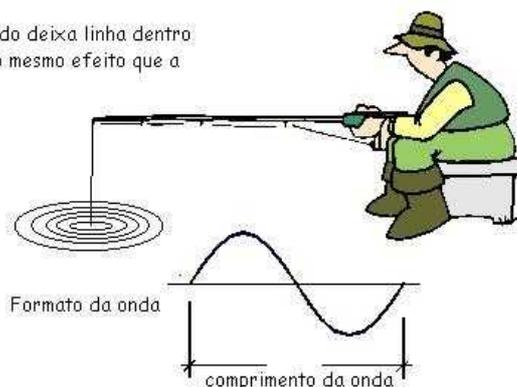
âmbar (pedras amarelas resultados de seiva de arvores pré-históricas fossilizadas) esta adquiria a propriedade de atrair objetos como folhas secas, é o mesmo fenômeno que observamos quando ao pentear os cabelos

verificamos que o pente passa a atrair pedaços de papel. O nome eletricidade surgiu somente no século 16, porque o nome do âmbar em grego é “elektron”, e daí a palavra eletricidade. Tales também observou que existiam umas estranhas pedras pretas que atraíam metais, em particular o ferro das espadas utilizadas na época, e como a região onde foram encontradas estas pedras chamava-se Magnésia, na Turquia, foram chamadas de “Magnetos” e mais tarde “Ímãs”. Ao longo dos séculos os pesquisadores observam que Magnetismo e Eletricidade se relacionavam, era possível produzir eletricidade através do magnetismo e produzir magnetismo através da eletricidade e que eles se propagavam através do espaço na forma de *ondas eletromagnéticas*, ou seja, energia elétrica e magnética pulsando e sendo transmitida!

O conceito de onda

O conceito de onda é semelhante aos das ondas que observamos na superfície da água quando a agitamos. A perturbação produzida faz com que a água se movimente criando “cristas” que se espalham pela superfície com uma determinada velocidade. No caso da eletricidade é do magnetismo acontece a mesma coisa, quando “agitamos” um corpo carregado de eletricidade ou magnetismo nos geramos ondas eletromagnéticas.

O pescador quando deixa linha dentro da água produz o mesmo efeito que a pedra atirada.

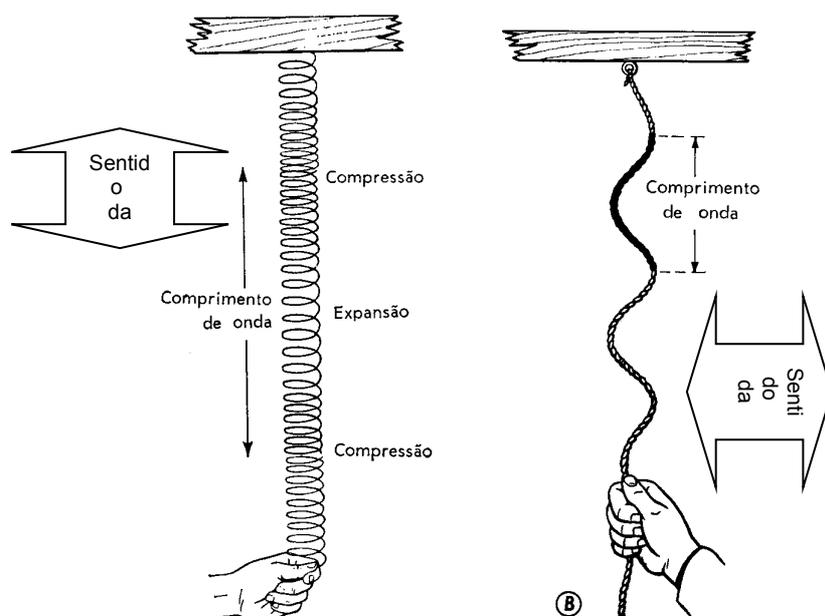


Características das ondas

Entender o conceito de comprimento de onda e o modelo de onda utilizado para descrever a luz é importante porque através deles podemos explicar como funcionam alguns recursos ópticos utilizados na área de óptica

oftálmica como os filtros utilizados para tratamento terapêutico, as técnicas de medição que aplicam o conceito de frente de onda para correção de problemas de visão e projeto de lentes oftálmicas e o funcionamento tratamento anti-reflexo.

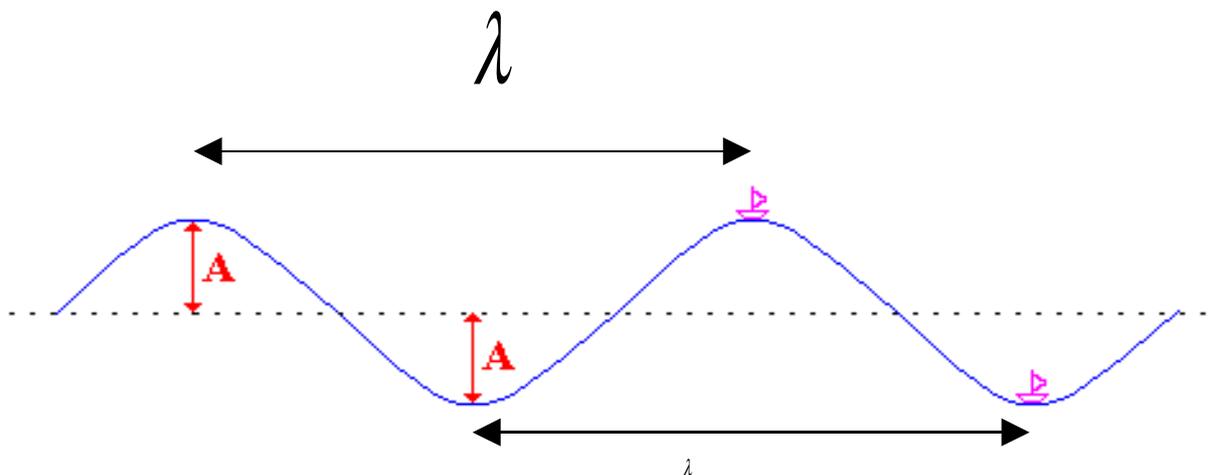
Foram as propriedades como refração, reflexão, difração e polarização que levaram os pesquisadores a atribuir a luz a natureza ondulatória. Existem dois tipos de onda, as transversais e as longitudinais, a luz se propaga na forma de ondas transversais, por isso nos prenderemos aos detalhes deste tipo de onda. Na figura abaixo ilustramos os dois tipos de onda, as longitudinais produzidas pela compressão de uma mola e as transversais produzidas pela agitação de uma corda. O nome transversal e longitudinal vem em função do sentido da vibração.



Em uma corda, se a mantivermos esticada e fizermos um rápido movimento lateral (transversal) com a mão observaremos uma perturbação, uma onda se propagando através dela. Se prosseguirmos com o movimento terá uma série de ondas se propagando.

Algumas características das ondas devem ser observadas, o primeiro é o *comprimento de onda*, que é a distância entre duas cristas, ou dois picos das ondas, representada pela letra grega “lambda” (λ). Outra característica para observar é o *período*, representado pela letra T, que é o intervalo de tempo

entre a ocorrência de duas cristas. Mais utilizado do que período tem a *freqüência* (f), que é o inverso período, que indica quantas ondas ocorreram num determinado espaço de tempo, normalmente é o utilizado o *segundo* como unidade de tempo e a unidade da freqüência é o *Hertz* (Hz - períodos por segundo).



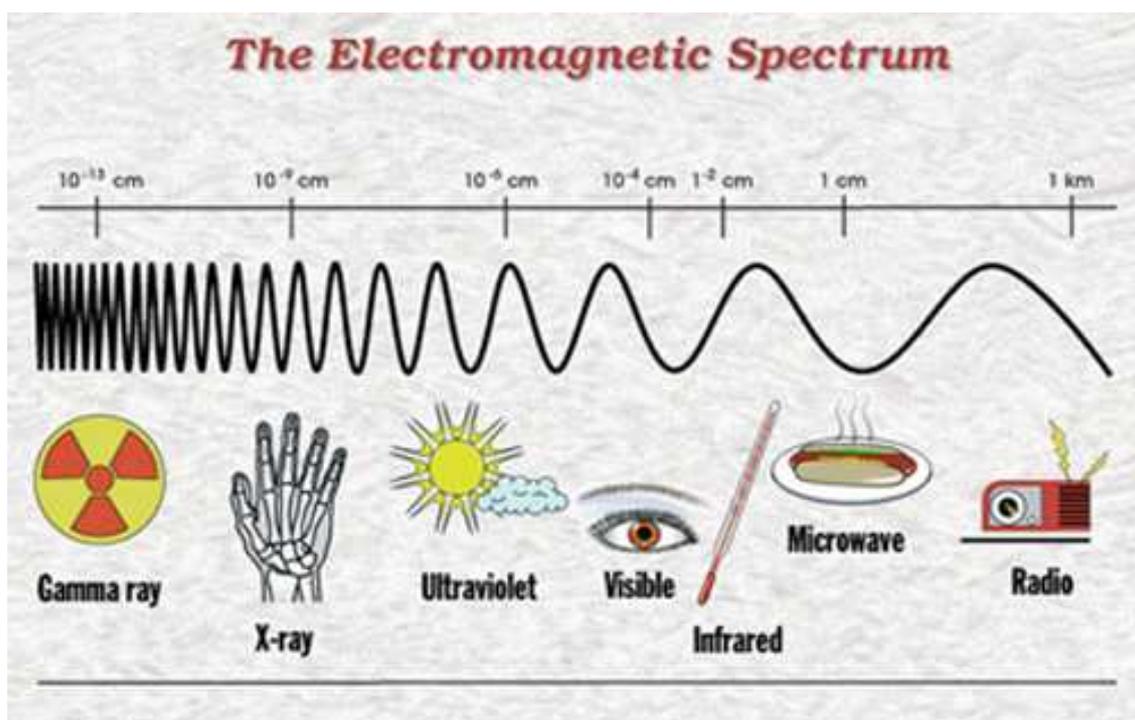
Como curiosidade podemos citar as estações de rádio quando apresentam seu prefixo ao longo da sua programação se referem ao seu comprimento de onda e freqüência que operam.

A luz como onda eletromagnética

A luz é um tipo particular de *onda eletromagnética*, assim como as ondas de rádio, as microondas, os raios ultravioleta, os raios infravermelhos, os raios x e raios gama. Cada família de ondas eletromagnéticas é identificada por sua freqüência ou seu comprimento de onda. Cada cor de luz também possui um comprimento de onda específico.

A tabela a seguir nos dá uma idéia da ordem de grandeza das ondas de cada “família”.

Onda	Comprimento (metros)	Freqüência (Hz)
Radio	10.000 até 0,0001	10^3 a 10^{10}
Microondas	0,1 a 0,001	10^9 a 10^{12}
Infravermelho	0,0001 até 0,000001	10^{12} a 10^{14}
Luz	0,0000001	10^{14} a 10^{15}
Ultravioleta	0,0000001	10^{15} a 10^{16}
Raios X	0,00000001 até 0,00000000001	10^{16} a 10^{21}
Raios Gama	0,00000000001 até 0,000000000001	10^{19} a 10^{24}



Quanto menor o comprimento de onda, maior é a quantidade de energia que possui a radiação eletromagnética. Assim as radiações ultravioletas, raios x e raios gama, em determinadas intensidades podem produzir sérios danos no organismo humano a nível celular, podendo inclusive produzir doenças como o câncer.

Como o metro passa a ser uma unidade de medida muito grande para avaliar o comprimento de onda da luz, utilizaremos o *nanômetro* que equivale a *um metro dividido por um bilhão*, e representaremos pela notação “nm”. A tabela a seguir indica a faixa de comprimentos de onda correspondentes a cores do espectro luminoso. A luz branca não nada mais do que a soma de todas estas cores.

Para termos uma idéia do “tamanho” de uma onda, basta dizer o comprimento de onda de luz amarela é cerca de 180 vezes mais fino do que um fio de cabelo.

Cor	Comprimento de onda (nanômetros)
Infravermelho (*)	2800 a 760
Vermelho	760 a 620
Laranja	620 a 590
Amarelo	590 a 560

Verde	560 a 490
Azul	490 a 450
Violeta	450 a 380
Ultravioleta A (*)	380 a 315
Ultravioleta B (*)	315 a 280
Ultravioleta C (*)	280 a 100

(*) não é considerada luz visível

Ao longo do curso retomaremos as características das ondas para poder explicar os conceitos de polarização, interferência e frente de onda.

Princípios relativos a aplicação de filtros em lentes oftálmicas

Transmitância

Ao incidir sobre um material transparente, grande parte a luz atravessa o material, porém uma parte é refletida ou absorvida. Para medir a quantidade de luz que atravessa o material defini-se uma grandeza chamada de *Transmitância*, indicado pela letra “T” ou pela letra grega “tao” (τ) onde “I” é quantidade de luz que efetivamente atravessou o material e “I₀” é a quantidade de luz que incidiu.

$$T = \frac{I}{I_0} \times 100$$

Normalmente tratamos com a *Transmitância Espectral*, ou seja, a quantidade de cada cor de luz que atravessa o material e assim criamos um gráfico denominado *Gráfico de Transmitância* que indicará todos os valores relativos a um material específico.

Existem diversas lentes filtrantes com finalidades terapêuticas que necessitam possuir características específicas de transmitância. Para obter o efeito desejado precisam bloquear ou deixar somente algumas cores específicas. O objetivo é melhorar o contraste e ou evitar que alguma parte da radiação, como a da cor azul, acelere o desenvolvimento de alguma patologia verificada. Mesmo os óculos solares sem função terapêutica são classificados

em função de sua transmitância, a tabela abaixo tirada da norma ABNT 15094-3 mostra como devem ser classificadas as lentes utilizadas em óculos segundo a sua transmitância.

Tabela 1 - Categorias para transmitância luminosa e transmitância permissível relativa na região espectral do ultravioleta solar

Categorias	Região espectral no visível		Região espectral no ultravioleta	
	Região de transmitância luminosa τ_V		Valor máximo de transmitância de UV-A solar τ_{SUVA}	Valor máximo de transmitância de UV-B solar τ_{SUVB}
	Acima de %	até %	Acima de 315nm até 380nm UV-A	Acima de 280nm até 315nm UV-B
0	80,0	100,0	τ_V	τ_V
1	43,0	80,0		0,125 τ_V
2	18,0	43,0		
3	8,0	18,0		0,5 τ_V
4	3,0	8,0		

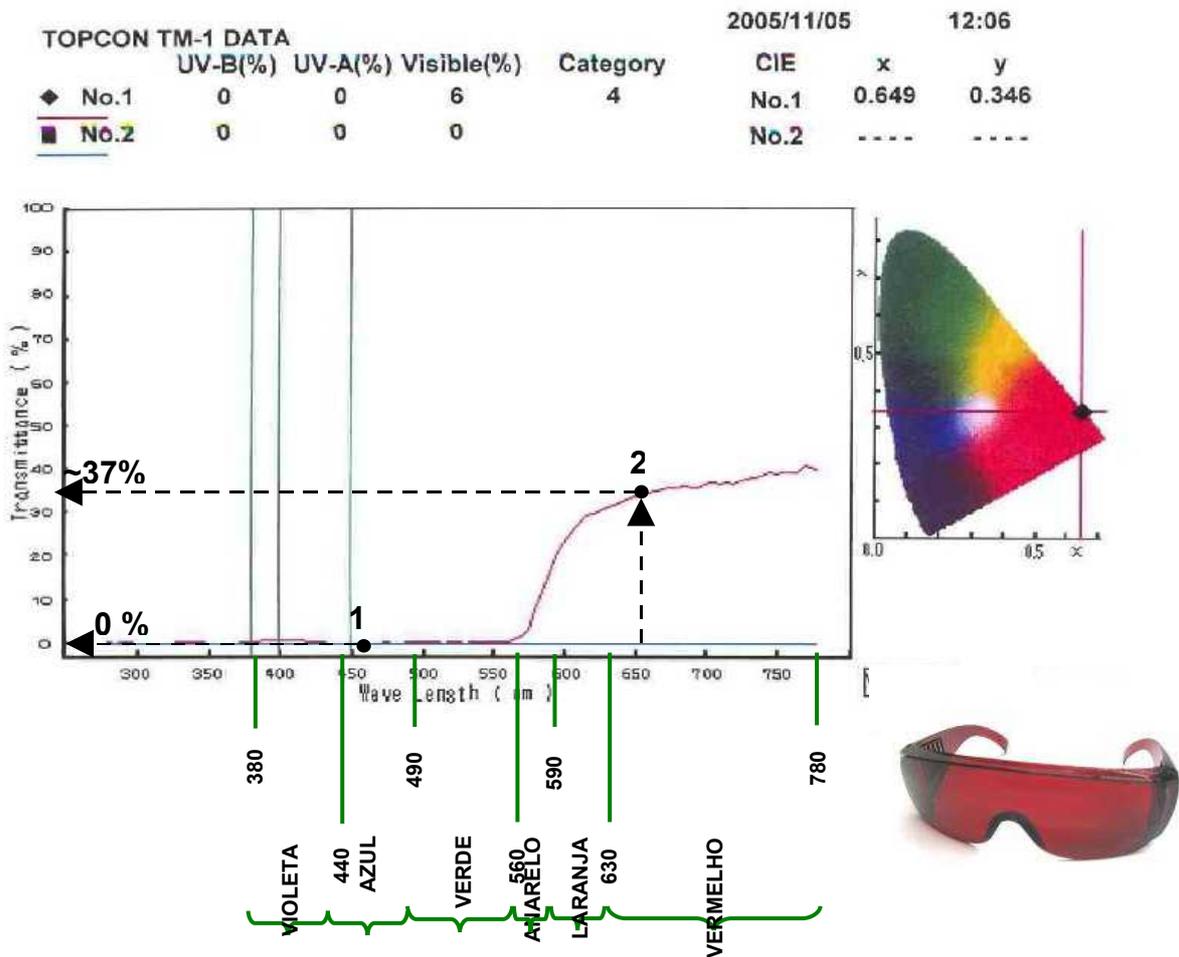
NOTA 1 Lentes fotocromáticas para óculos pertencem em geral a duas categorias, correspondentes respectivamente ao estado mais claro e ao estado mais escurecido.

NOTA 2 Os requisitos de UV para lentes fotocromáticas para óculos no estado mais escurecido podem ser verificados no estado mais claro, se os requisitos de UV para o estado mais escurecido são atingidos no estado mais claro.

NOTA 3 Recomenda-se que colorações uniformes ou com gradientes sejam encomendadas ao fabricante por meio de código de identificação, nome ou número de referência.

Assim é obrigação do fabricante dos filtros apresentar o gráfico de transmitância do material oferecido, assim os óculos solares devem indicar a categoria de filtragem em que se enquadram. Normalmente destes filtros se refere ao valor limite de comprimento de onda que é filtrado, ou seja, qualquer valor inferior ao especificado será filtrado nesta lente. No exemplo abaixo mostramos um gráfico de transmitância onde observamos que no eixo vertical temos a transmitância e no eixo horizontal estão os comprimentos de onda correspondentes a cada cor. Para facilitar indicamos as faixas de comprimento de onda correspondentes a cada cor. Para ilustrar, pegamos dois pontos quaisquer do gráfico para verificar a transmitância correspondente. No ponto 1, que se encontra dentro da faixa da cor azul, em aproximadamente 470 nm, verificamos um transmitância de 0%, ou seja, esta cor é particular é

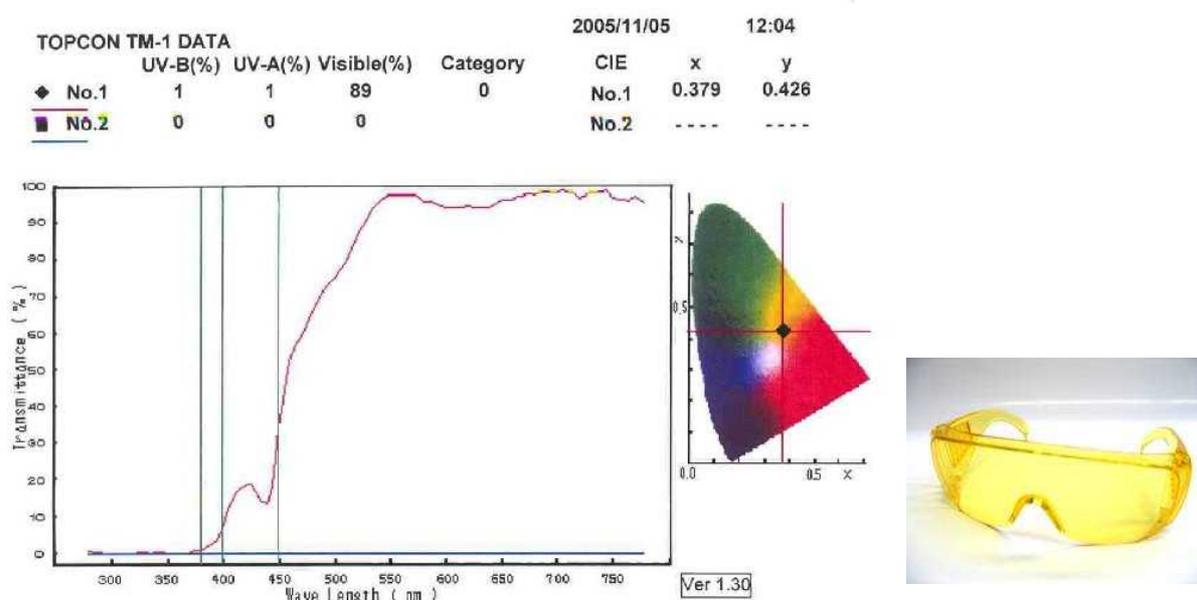
completamente filtrada por estes óculos. Ao observarmos o ponto 2, que corresponde a aproximadamente 670 nm, dentro da faixa do vermelho, verificamos uma correspondência de aproximadamente 37% de transmitância para esta cor. Em função da limitação da escala apresentada que apresentamos os valores como aproximados, se necessitássemos de maior precisão precisaríamos de um gráfico com uma escala mais bem definida. Podemos através de uma análise concluir que estes óculos em particular filtram toda a luz que possua um comprimento de onda inferior a 560 nm e deixa passar os demais comprimentos, porém num valor de transmitância não superior a 40%. Assim podemos dizer que a recomendação para utilização deste filtro ocorrerá provavelmente em locais altamente iluminados, como sob a



luz solar no horário próximo ao meio dia.

O gráfico a seguir mostra outro filtro largamente utilizado, não só com finalidade terapêutica como para utilização no período noturno, particularmente para motoristas. Podemos perceber que ele possui uma capacidade menor de

filtragem, uma vez que sua transmitância é elevada para a maioria das cores, sendo especialmente reduzida na faixa da cor azul, onde podemos considerar uma transmitância máxima de aproximadamente 20% dentro desta faixa. Para o limite superior da faixa correspondente ao azul, no valor de 450 nm, no entanto a transmitância é de 15% aproximadamente. Vemos que para a faixa superior a 550 nm a transmitância atinge valores próximos de 100% onde podemos concluir que sua aplicação em locais de iluminação de menor intensidade como o ambiente externo a noite ou mesmo outros de iluminação fraca. Os comprimentos de onda relativos à radiação ultravioleta são completamente filtrados nestes óculos, pois observamos uma transmitância de 0% abaixo de 380 nm.



O conceito de contraste

Aqui também vale uma pausa para explicar o conceito de *contraste*. Consideremos a letra da “A” da figura abaixo em cor preta, impressa sobre um fundo branco. Contraste é justamente a diferença de luminosidade existente entre o fundo da figura e a própria e figura e que nos permite perceber os contornos da figura com nitidez. Já, se utilizarmos dois tons de cinza para o fundo e para a letra esta diferença de luminosidade, o contraste, diminui dificultando a percepção dos contornos. Sob iluminação muito intensa este

efeito se acentua, por isso nem sempre uma iluminação exagerada pode ser a melhor solução se não houver preocupação com o contraste.



A utilização de filtros permite justamente acentuar o contraste, aumentando a diferença entre a luminosidade do fundo e a do objeto, que facilita a percepção de contornos, melhorando a acuidade visual do usuário, porém prejudicando a discriminação de cores.



Neste ponto se aplica um breve parêntese para um interessante artigo da Dr. Érika Magalhães:

Efeitos nocivos da luz azul sobre o epitélio pigmentar da retina

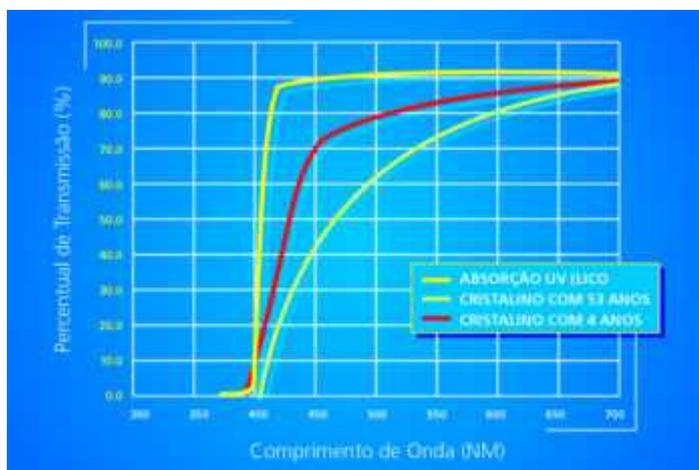
DRA. ERIKA MAGALHÃES

Existem, atualmente, estudos experimentais demonstrando que a lipofuccina, que é um pigmento que se acumula na retina de pessoas mais velhas, apresenta um mecanismo fotoquímico que provoca lesão nessa estrutura do olho.

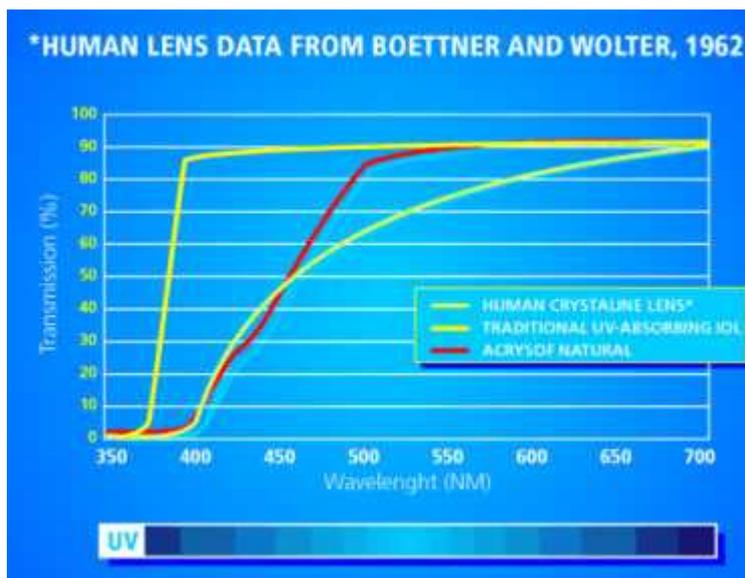
O que ocorre é que o cristalino de pacientes acima de 50 anos absorve, naturalmente, mais luz azul do que o cristalino de uma criança ou de pacientes pseudofácicos que têm implantes de LIOs convencionais que absorvem apenas a luz ultravioleta.

Após sofrer excitação pela luz azul, a lipofuccina libera oxigênio singleto, que provoca lesão no epitélio pigmentar da retina. Teoricamente, isso seria um fator que levaria a um agravamento da degeneração macular relacionada à idade.

Um grupo de pesquisadores da Universidade de Colúmbia, nos EUA, publicou na Investigative Ophthalmology and Visual Science, no ano de 2000, um trabalho demonstrando que um componente da lipofuccina (a lipofuccina A2E) é responsável por essa absorção da luz, com conseqüente apoptose das células do epitélio pigmentar da retina e degeneração macular relacionada à idade.



- Todas as pessoas devem usar óculos com proteção contra luz UV (ultravioleta) o mais cedo possível.
- Mas além da UV, a luz azul também tem um papel potencialmente lesivo para a retina envelhecida.
- O comprimento de onda da luz azul nociva é 430 a 470 nanômetros maior do que o comprimento de onda da luz ultravioleta.
- Os óculos e LIOs convencionais têm apenas proteção contra UV. Não absorvem a luz azul, porque só oferecem proteção para comprimentos de onda de até 400 nanômetros.



Diante disso, alguns fabricantes têm incorporado às LIOs convencionais filtros amarelos que absorvem a luz azul. Entretanto, apesar de já existir um embasamento teórico bem sustentado através de estudos experimentais, somente o acompanhamento dos pacientes a longo prazo, com amostragem significativa, poderá comprovar se essa proteção acoplada às LIOS terá realmente um efeito benéfico sobre o epitélio pigmentar da retina e conseqüente redução do risco de DMRI.

Como os filtros influenciam na discriminação de cores sua utilização nos casos de condução de veículos de ser particularmente considerada uma vez que pode prejudicar a visualização da sinalização de trânsito, como no caso dos semáforos, a lentes de cor azul filtram particularmente a cor vermelha.”

(Retirado do site www.portaldaoftalmologia.com.br/home/artigos.asp?cod=11)

Observação: o assunto dos riscos da luz azul é um assunto amplamente discutido na comunidade médica, vale a pena pesquisar e procurar a opinião de outros profissionais quanto ao assunto.

Associação de filtros

Se alinharmos dois filtros, a transmitância resultante será o produto das transmitâncias individuais de cada filtro.

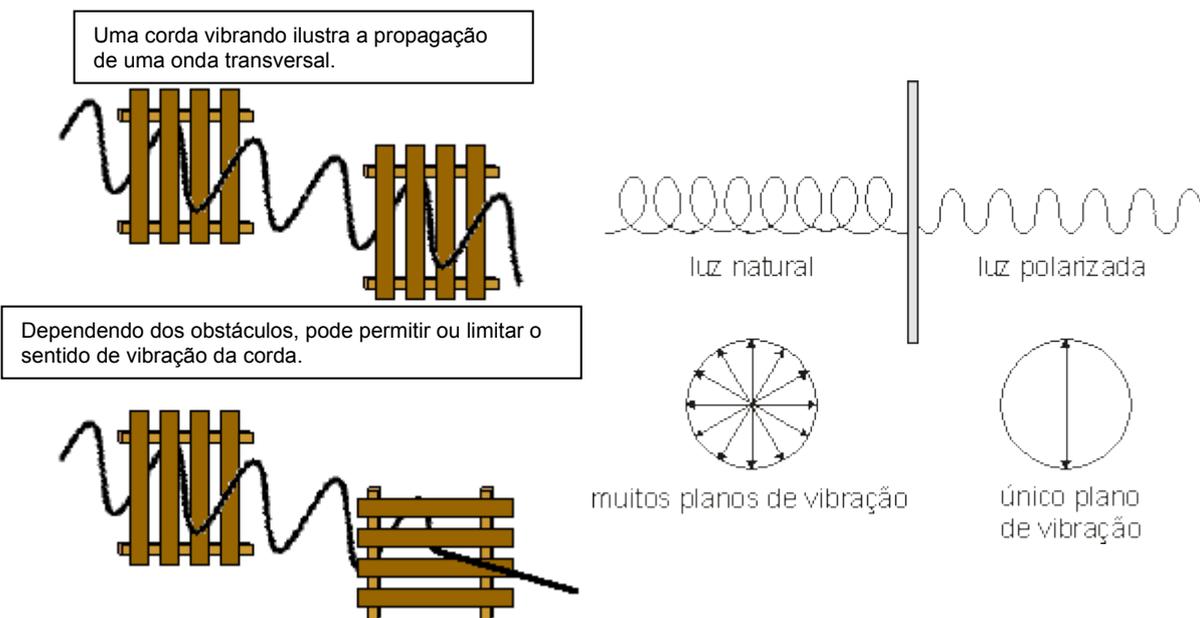
Exemplo: Consideremos um filtro com transmitância de 70% e outro com transmitância de 60%, a transmitância total será de 42%

$$T = 0,7 \times 0,6 = 0,42$$

Polarização

Uma vez que a luz viaja na forma de ondas no espaço tridimensional, temos ondas vibrando em todas as direções. Fenômeno da polarização é um dos argumentos para justificar a natureza da luz com uma onda transversal.

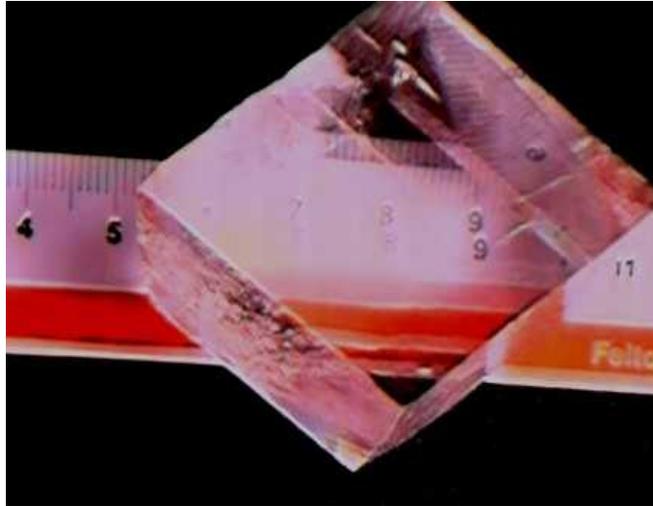
Quando verificamos que todas as ondas de luz vibram numa mesma



direção observamos um fenômeno denominado *polarização*. Existem diversas formas de polarização, neste caso dizemos que as ondas são *planas polarizadas*, outras formas são a polarização circular e a elíptica, mas que não nos interessam no caso da óptica oftálmica.

Existem alguns materiais que, em função de sua estrutura molecular, filtram a luz permitindo que somente a luz que vibra em uma determinada direção vibre. Alguns materiais denominados *bi-refringentes* (que possuem dois índices de refração) fazem com que a luz que os atravessam se divida em dois

feixes polarizados, outros simplesmente absorvem um dos feixes deixando somente que o outro passe. A figura abaixo mostra um cristal de calcita (CaCO_3) onde a imagem dupla da escala da régua ocorre justamente porque a luz é decomposta em dois feixes polarizados.



Quando a luz incide sobre uma superfície plana, parte da luz que é refletida é normalmente polarizada em um plano paralelo a superfície refletora.



Então superfícies como pisos muito lisos, vidros de pára-brisa de

Somente a luz que vibra na direção vertical passa nele



Luz refletida de alguma superfície.

automóveis, superfícies de rios e lagos refletem uma quantidade significativa de luz polarizada. Este tipo de reflexo acaba prejudicando a qualidade visão,

pois geram certo ofuscamento e perda da percepção de contraste, assim filtros polarizadores tornam-se interessantes nestes casos.

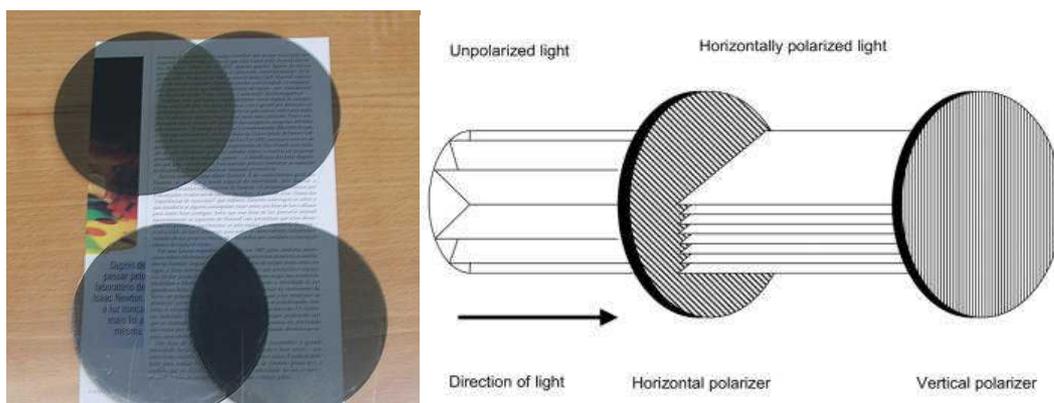
As imagens a seguir mostram a mesma cena vista sem um filtro polarizador, à esquerda, e a outra através de um filtro polarizador.



Assim ao serem montados em óculos este tipo de filtro tem uma posição exata, caso contrário não produzirá o efeito desejado e, lembrando um caso comum, de uma vitrine que está na vertical produz um reflexo polarizado verticalmente, paralelo ao plano da vitrine, então não será filtrado pela lente.

É importante corrigir a terminologia, as lentes são chamadas de *polarizadoras*, quem é polarizada é a luz.

Ao alinhar dois filtros polarizadores cruzados da 90° estará barrando completamente a passagem da luz. Nas figuras abaixo, onde as lentes da parte superior da folha estão alinhadas e deixam a luz passar, já as lentes da parte inferior estão cruzadas em um ângulo de 90° uma em relação à outra.



Uma outra curiosidade ocorre com materiais transparentes submetidos à tensão, como lentes que sofrem um aperto excessivo na hora de montagem onde elas passam a agir como filtros polarizadores nas regiões submetidas à pressão da montagem. O choque térmico, produzido pelo resfriamento

acelerado de um material, como no caso de endurecimento de lentes e na produção de lentes de policarbonato, também produz este tipo de efeito.

Existe um equipamento denominado polariscópio, simples de ser fabricado e que possibilita a verificação deste efeito. São dois filtros polarizados montados a 90° um relação a outro. Caso a lente colocada entre os dois filtros apresente algum problema ela modificará a forma de polarização da luz, permitindo que a luz passe através dos filtros.



No caso da figura à esquerda temos um exemplo de polariscópio e à direita o aspecto colorido da lente é característico do policarbonato que é produzido através de um resfriamento muito rápido e que gera o acumulo de tensões, além disso, observamos um furo mal feito que acabou produzindo mais tensões no material.

É freqüente ouvir reclamações de pessoas que ao colocarem lentes polarizadas observam manchas em determinados vidros como portas de banco, vitrines ou pára-brisas de automóveis mais antigos, pois normalmente estes materiais são tratados termicamente para aumentar sua resistência gerando este tipo de fenômeno.

O problema do asfalto citado em muitos sites deve ser visto com cuidado, pois existem dois tipos de fenômenos envolvidos na luz vem dele. Um deles é o reflexo que produz a luz polarizada horizontalmente que pode ser filtrada por uma lente. Outro fenômeno é relativo à refração que acontece porque o sol que incide sobre o asfalto gera um aquecimento na camada de ar que está em contato com ele alterando seu índice de refração. A diferença entre o índice de refração desta camada de ar que está em contato com o asfalto com as camadas superiores gera um fenômeno denominado reflexão total, que produz a ilusão de uma superfície líquida, uma miragem e que pode não ser completamente filtrada pela lente.

Em nosso próximo texto daremos continuidade tratando de outras características das ondas, a *Interferência*.