

---

## FRESNEL: O FORMULADOR MATEMÁTICO DA TEORIA ONDULATÓRIA DA LUZ

---

José Maria Filardo Bassalo  
Depto de Física – UFPa  
Belém – Pa

### Resumo

*Neste artigo, apresentamos alguns aspectos da vida de Fresnel, engenheiro e físico francês que se notabilizou pela formulação matemática da teoria ondulatória da luz, e cujo bicentenário de nascimento transcorre neste ano de 1988. Realçamos, neste trabalho, suas principais pesquisas relacionadas com o estudo da difração, dupla-refração e reflexão da luz, nas quais utilizou a idéia revolucionária de transversalidade da onda luminosa para deduzir equações, as quais explicaram alguns resultados experimentais que eram polêmicos em sua época. Por fim, destacamos duas experiências cruciais realizadas em 1833 e 1850, uma sobre a formação de cores em películas delgadas (airy) e a outra sobre a determinação da velocidade da luz em meios mais densos que o ar (Foucault, Fizeau), respectivamente.*

*Palavras-chave: Fresnel, Dupla-Refração da Luz, Difração da Luz, Reflexão e Refração da luz, Polarização da Luz, Teoria Matemática da Onda Luminosa, Velocidade da Luz, Éter Luminífero.*

Neste ano de 1988, comemora-se o segundo centenário de nascimento de Fresnel, o físico francês que colocou em bases matemáticas a teoria ondulatória da luz, que havia sido formulada pelo físico e astrônomo holandês Christiaan Huygens (1629-1695), o qual apresentou-a em seu “*Traité de la Lumière*” publicado em Paris, em 1678.

Filho de arquiteto, Augustin-Jean Fresnel nasceu em Broglie, Eure, Normandia, em 10 de maio de 1788. Devido à débil saúde que possuía, sua educação procedeu-se de maneira lenta, razão pela qual apenas aos oito anos de idade aprendeu a ler. Em seus primeiros estudos, Fresnel mostrou pouco interesse para línguas, no entanto, sua habilidade para Matemática o encaminhou para a Escola Politécnica. Porém, interessado em obras públicas, cedo se transferiu para a Escola de Pontes e Calçadas, tendo-se graduado em Engenharia Civil, por volta de 1806. Na Escola Politécnica, foi colega do físico francês Dominique-François-Jean Arago (1786-1853) de quem se tornou amigo e colaborador, tendo, juntos, realizado o célebre trabalho que evidenciou o caráter de transversalidade da onda luminosa.

Como engenheiro, Fresnel trabalhou, por diversos anos, em vários Departamentos públicos franceses. Contudo, essa carreira de funcionário público foi interrompida com a volta do Imperador Napoleão Bonaparte (1769-1821) de seu exílio da Ilha de Elba, em 1815. Não sendo “bonapartista”, e tendo recrutado um pequeno grupo de pessoas no Sentido de impedir a volta de Napoleão de seu exílio, Fresnel foi preso e destituído de seu cargo de engenheiro e, em conseqüência, refugiou-se no interior da França. Essa punição durou apenas cem dias, já que Napoleão foi derrotado na famosa *batalha de Waterloo*, ocorrida ainda em 1815, na qual a França lutou contra os ingleses, sob o comando do Duque de Wellington (1769-1852), e contra os prussianos, sob o comando de Gebhard Leberecht von Blücher (1742-1819).

Provavelmente, em virtude desse incidente com os bonapartistas, Fresnel começou então suas pesquisas em óptica. De regresso à Paris, em virtude da queda de Napoleão, e alertado por seu amigo Arago a respeito das experiências do físico e médico inglês Thomas Young (1773-1829) sobre *interferência luminosa*, intensificou mais ainda seus trabalhos nesse assunto, a partir de 1815. Como não dispunha de qualquer aparelhagem especial para essa sua pesquisa, improvisou dois espelhos e dois prismas - os hoje conhecidos como *espelho duplo* e *biprisma de Fresnel* - e com eles obteve belas figuras de interferência. Em seguida, passou a estudar o fenômeno da *difração da luz*, que havia sido descoberto pelo físico italiano Francesco Maria Grimaldi (1618 -1663), e que só foi divulgado em seu livro “*Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus et Iride*”, editado em 1665, após sua morte. Os primeiros resultados sobre a difração da luz obtidos por Fresnel foram, inicialmente, publicados na “*Annales de Chimie et Physique*” (v. 1, n. 2, p. 239, 1816). Esse trabalho, um pouco mais elaborado, foi então apresentado por seu amigo Arago à Academia Francesa de Ciências, em reunião realizada no dia 15 de julho de 1816.

Combinando o princípio da interferência de Young e o princípio de Huygens para a construção das frentes de ondas (cada ponto em uma frente de onda pode ser considerado como uma fonte de ondas esféricas secundárias, cuja

envoltória constitui a nova frente de onda em um tempo posterior), Fresnel explicou matematicamente uma série de experiências que realizou sobre a difração da luz em obstáculos, extremidades finas de objetos e aberturas em anteparos: essa combinação ficou mais tarde conhecida como *principio de Huygens - Fresnel*. Para Fresnel, segundo esse princípio, a amplitude da onda luminosa que passa através de uma abertura (ou é interceptada por um obstáculo) em um determinado ponto de um anteparo é a soma (interferência) de todas as ondas secundárias oriundas da abertura (ou do obstáculo). Para o cálculo dessas ondas secundárias, Fresnel desenvolveu um método engenhoso, segundo o qual a área da abertura (ou do obstáculo) era dividida em uma série de zonas de igual área - as chamadas *zonas de Fresnel*. Esse método era relativamente simples quando aplicado a aberturas (ou obstáculos) circulares e dos pontos situados sobre o eixo de simetria, porém, para outros pontos e outras formas geométricas de aberturas (ou obstáculos), esse método envolveu certos tipos de integrais de funções trigonométricas de difícil solução, integrais essas, que passaram a ser conhecidas como *integrais de Fresnel*. Mais tarde, em 1874, Marie Alfred Cornu (1841-1902) relacionou essas integrais com as propriedades geométricas de uma espiral e desenvolveu, em consequência, um método geométrico para o cálculo numérico dessas integrais, que ficou conhecido como *espiral de Cornu*.

Na época em que Fresnel desenvolveu a matemática da teoria ondulatória huygensiana da luz, havia uma grande polêmica entre essa teoria e a teoria corpuscular ou da emissão proposta pelo físico e matemático inglês Sir Isaac Newton (1642-1727), em seu livro "Optics", publicado em 1704. Essa teoria newtoniana possuía muitos adeptos dentre os físicos franceses, tais como Pierre Simon de Laplace (1749-1827), Jean-Baptiste Biot (1774-1862), Siméon Denis Poisson (1781-1840) e seu próprio amigo Arago, tendo, inclusive, alguns deles, formulado teorias para melhorar essa teoria corpuscular. Como esses físicos tinham uma grande influência na Academia Francesa de Ciências, fizeram com que essa, em março de 1817, escolhesse como tema, de seu Prêmio de 1818 a difração da luz, na esperança de que a teoria da emissão salisse fortalecida daquela polêmica. Fresnel concorreu a esse Prêmio com um trabalho que era um estudo bem mais aprofundado das memórias que havia apresentado àquela Academia, em 1816.

Em uma das sessões da Academia em que Fresnel apresentou sua teoria, Poisson, que era um dos membros do Comitê de Julgamento do Prêmio (os outros eram Laplace, Biot, Arago e o químico francês Joseph-Louis Gay-Lussac -1778-1850), mostrou, através de cálculo, que se a teoria fresneliana fosse verdadeira, deveria haver um ponto brilhante no centro da sombra projetada de um pequeno disco circular. Isso era um absurdo, concluiu Poisson. Arago, grande amigo de Fresnel e também presente à mesma, prometeu que na próxima sessão da Academia confirmaria ou não a conclusão a que chegara Poisson. Montando sem demora um dispositivo experimental, Arago conseguiu obter o "ponto brilhante" de Poisson. Aliás, esse "ponto brilhante" havia sido observado pelo astrônomo francês Joseph-Nicholas Delisle (1688-1768), no começo do século XVIII, porém, ninguém o considerara. Com esse experimento, Arago rendeu-se à teoria ondulatória, mas Biot ficou com Newton e brigou com seu amigo Arago e, obviamente, Fresnel ganhou o Prêmio da Academia Francesa de Ciências de 1818.

Ainda em 1816, Fresnel preocupou-se com um outro renome no óptico, cuja explicação desafiava os cientistas que estudavam a óptica, quer os partidários da teoria corpuscular, quer os partidários da teoria ondulatória. Tratava-se da *dupla-refração*, que havia sido descoberta pelo médico dinamarquês Erasmus Bartholinus (1625 - 1698), em 1669, ao observar que a luz, ao atravessar um tipo de cristal chamado de espato-da-islândia (calcita), separava-se em dois raios: o "ordinário" que obedecia à lei de Snell-Descartes, e o "extraordinário" que não obedecia a essa mesma lei. Com a idéia de que só havia interferência de ondas luminosas provenientes de uma mesma fonte, Fresnel e seu amigo Arago tentaram, sem sucesso, interferir esses raios ordinário e extraordinário. Em vista desse insucesso, Arago foi conversar com Young, que se notabilizara por haver obtido em 1801 as primeiras figuras de interferência entre raios luminosos, além de outros resultados importantes da óptica. Na experiência realizada por Fresnel e Arago, eles observaram que os raios ordinário e extraordinário estavam polarizados em planos perpendiculares.

A *polarização da luz* era um outro fenômeno físico que também intrigava os ópticos. Ela havia sido descoberta pelo físico e coronel-engenheiro Étienne-Louis Malus (1775 - 1812), em 1808, ao observar em sua casa, através de um cristal de calcita, a luz refletida nas janelas do Palácio de Luxemburgo. Por essa ocasião, ele fez uma observação curiosa, qual seja, a de que as duas imagens obtidas por dupla-refração na calcita variavam de intensidade (chegando mesmo uma delas a desaparecer), quando esse cristal era girado em torno do raio solar refletido. No entanto, isso não ocorria quando a luz do Sol era observada diretamente através do espato-da-islândia. Desse modo, Malus acabara de descobrir a polarização por reflexão. O próprio Malus, partidário da teoria corpuscular da luz, tentara dar explicações, calcadas nessa teoria, tanto para o fenômeno que acabara de descobrir, como também para a dupla-refração. Por sua vez, Young, aproveitando a consulta que lhe fizera Arago, e sendo partidário da teoria ondulatória, tentou explicar esses fenômenos aventando uma hipótese audaciosa, qual seja, a de que a luz era uma onda transversal. Essa idéia foi comunicada a Arago em duas cartas escritas por Young: uma no dia 12 de janeiro de 1817 e a outra no dia 29 de abril de 1818. É oportuno salientar que essa idéia de transversalidade da onda luminosa já havia sido considerada pelo físico inglês Robert Hooke (1635-1703), por volta de 1672.

A idéia de transversalidade da onda luminosa, proposta por Young, foi a chave para Fresnel explicar a experiência que fizera com Arago, em 1816, sobre a não-interferência dos raios ordinário e extraordinário oriundos de uma dupla-refração, já por nós referida anteriormente. Para Fresnel, esses raios não interferiam porque vibravam transversalmente e em direções perpendiculares entre si. Apesar desse trabalho haver sido publicado na “Annales de Chimie et Physique” (v. 10, n. 2, p. 288, 1819), em nome de Fresnel e de Arago, esse último não concordou com a idéia “atrevida” da transversalidade da onda luminosa, conforme declarou posteriormente. Essa idéia desencadeou uma grande polêmica com relação ao meio transmissor da luz, isto é, o *éter luminífero*, da qual, como era de se esperar, Fresnel participou ativamente, conforme veremos a seguir.

Em 1818, Fresnel havia investigado o importante problema da influência do movimento da Terra sobre a propagação da luz, com o objetivo de verificar se havia diferença entre a luz proveniente de fontes estelares e terrestres. Nessa altura, Arago havia mostrado experimentalmente que não havia nenhuma diferença entre essas duas fontes, além da *aberração da luz*, fenômeno esse observado e estudado pela primeira vez pelo astrônomo inglês James Bradley (1693-1762), em 1728. Segundo esse físico, a pequena diferença entre as posições angulares das estrelas decorria do movimento da Terra e do valor finito da velocidade da luz. Esses fatos acrescidos da condição de transversalidade da onda luminosa que Fresnel havia detectado em sua experiência com Arago, já mencionada, levaram-no a propor um novo modelo para o éter luminífero.

Desde Huygens, os partidários da teoria ondulatória da luz que o sucederam (exceto Hooke, conforme já o dissemos) acreditavam que as ondas luminosas eram longitudinais, já que, sendo ondas, deveriam ser como as sonoras, as únicas até então bem estudadas, pois não havia sido desenvolvida a teoria da propagação de ondas elásticas nos sólidos. Desse modo, sendo a luz uma onda, e considerando que o som “ondula” no ar, a luz deveria também “ondular” em um meio que ela atravessasse. Esse meio foi denominado de éter luminífero, nome dado pelo próprio Huygens e baseado no éter aristotélico-descartiano. (o filósofo grego Aristóteles - 384-322 - considerava o éter como a quinta essência de que eram formados os corpos celestes além da Lua e da Terra, por seu lado, para o filósofo francês René Descartes - 1596-1650 -, o éter era o meio perfeitamente elástico e transmissor da luz). No entanto, devido à alta velocidade da luz (~ 300 000 km/s), já então conhecida desde que o astrônomo dinamarquês Olaf Roemer (1644-1710) a medira em 1675, o éter deveria ser uma camada gasosa, extremamente rarefeita, não observável por intermédio dos instrumentos disponíveis à época. Porém, como os gases não resistem a esforços transversais, Fresnel formulou o modelo de um sólido para o éter luminífero, para poder explicar a transmissão das vibrações transversais luminosas através dele.

Com essa idéia em mente, a partir de 1821, Fresnel começou a estudar as propriedades dinâmicas do éter luminífero e, para isso, começou a examinar a propagação da luz em corpos cristalinos, quer os uniaxiais, como a calcita, quer os biaxiais, como a mica (descoberto pelo físico inglês David Brewster - 1781-1868 -, em 1815). Os cristais uniaxiais têm um *eixo óptico* e os biaxiais têm dois. Os cristais biaxiais, no entanto, apresentavam uma dificuldade, qual seja, a de que a dupla-refração nos mesmos não era explicada pela construção de Huygens, segundo a qual uma onda esférica primária, correspondente ao “raio ordinário”, se propaga no cristal com velocidade constante e em todas as direções; e uma onda esferoidal secundária, correspondente ao “raio extraordinário”, se propaga no cristal com velocidade variável. Essa construção de Huygens formalizava a doutrina de que, nos cristais, havia dois meios luminíferos diferentes: um para o “raio ordinário” e um outro para o “raio extraordinário”.

Para explicar a dupla-refração nesses dois tipos de cristais, Fresnel usou o conceito de transversalidade da onda luminosa que havia utilizado na experiência que fizera com Arago, em 1816, sobre a não-interferência dos raios “ordinários” e “extraordinários”, já por nós referida. Assim, para Fresnel, só havia um meio luminífero nos cristais, e as velocidades de propagação dos dois “raios” na dupla-refração nada mais eram do que as raízes de uma equação quadrática que representava uma superfície de onda de duas folhas. Essas folhas eram planopolarizadas e perpendiculares entre si. Essas superfícies de onda eram esferóides, no caso de cristais uniaxiais, e elipsóides, no caso de biaxiais. Tais superfícies de onda ficaram conhecidas como *superfícies de\_onda de Fresnel*. Essa primeira memória de Fresnel, sobre a dupla-refração, foi apresentada à Academia Francesa de ciências, no dia 19 de novembro de 1821. Uma semana depois, Fresnel apresentou, à mesma Academia, um suplemento dessa memória, no qual esboçava uma primeira explicação para a *dispersão da luz* levando em conta a estrutura molecular da matéria (mais tarde, em 1830, o matemático francês Augustin-Louis Cauchy - 1789-1857 - apresentou sua famosa teoria da dispersão, tornando como base a idéia molecular de Fresnel). A teoria da dispersão seria o grande trabalho de Fresnel, se a morte não o tivesse levado prematuramente, aos 39 anos de idade.

Com essa pesquisa sobre óptica de cristais, foi crescendo o prestígio científico de Fresnel a ponto de ele pretender um lugar na Academia Francesa de Ciências, quando, nesta, houve uma vacância. Porém, justamente em janeiro de 1823, mês em que sua candidatura foi rejeitada por essa Academia, ele apresentou à mesma uma nova memória, na qual, usando o seu modelo dinâmico sobre o mecanismo de vibrações transversais no éter luminífero,

deduziu as leis que regem a intensidade e a polarização de raios produzidos por reflexão e refração em superfícies espelhantes e refratoras, respectivamente. Encontrou, em consequência disso, expressões que representavam a relação entre as amplitudes das ondas incidente, refletida e refratada, expressões até hoje conhecidas como *leis de Fresnel*. Com essas expressões, Fresnel demonstrou alguns resultados experimentais, tais como o que havia sido obtido por Brewster, em 1815, de que o raio refletido é totalmente polarizado, quando os raios refletido e refratado são perpendiculares entre si. Demonstrou, também, as experiências que ele próprio havia comunicado à Academia Francesa de Ciências, em novembro de 1817 e em janeiro de 1818, relativas à *reflexão total*, e nas quais observara que luz polarizada em qualquer plano inclinado em relação ao plano de reflexão é parcialmente “depolarizada” por reflexão total.

Os trabalhos de Fresnel sobre difração, dupla-refração, reflexão e refração foram cada vez mais sendo utilizados e testados. Por exemplo, o físico e matemático irlandês Sir William Rowan Hamilton (1805-1865) que, em 1833, considerando as superfícies de onda de Fresnel, previu *a refração cônica*, cuja existência foi confirmada experimentalmente pelo físico irlandês Humphrey Lloyd (1800- 1881), também em 1833. Esses trabalhos estabeleceram bases tão fortes para a teoria ondulatória da luz que, na década de 1830, os jovens físicos não duvidavam mais da mesma. No entanto, alguns físicos mais velhos, dentre eles Brewster, permaneciam partidários da teoria corpuscular. A controvérsia entre essas duas teorias rivais foi resolvida em consequência de duas experiências cruciais.

Vejamos essas duas experiências. Segundo a teoria corpuscular, as cores em placas delgadas eram produzidas somente pela luz refletida pela segunda superfície da placa, enquanto, para a teoria ondulatória, essas cores eram decorrentes da interferência entre a luz refletida pelas primeira e segunda superfícies da placa. Portanto, se de algum modo a reflexão na primeira superfície fosse impedida, não haveria formação de cores se a teoria ondulatória fosse correta. Em uma experiência engenhosa realizada em 1833, o astrônomo inglês Sir George Biddell Airy (1801-1892) demonstrou que quando se faz incidir luz polarizada em uma lente revestida com uma película metálica espelhante, com um determinado ângulo de incidência, não há formação dos famosos “anéis de Newton”, anéis esses coloridos, confirmando, dessa forma, a hipótese da teoria ondulatória da luz. Aliás, o próprio Airy, em 1835, estudou matematicamente, e pela primeira vez, a difração de Fraunhofer através de aberturas circulares - o famoso “disco de Airy” - usando a teoria ondulatória da luz e, dessa forma, confirmou mais uma vez essa teoria.

A outra experiência crucial para decidir a polêmica entre as duas teorias rivais sobre a natureza da luz relacionou-se com o valor da velocidade da luz em um meio mais denso que o ar. Segundo a teoria corpuscular, a velocidade da luz seria tanto maior quanto mais denso fosse o meio no qual ela atravessasse. Por outro lado, a teoria ondulatória indicava exatamente o contrário, resultado confirmado pelo próprio Fresnel com a sua teoria da refração da luz. Em 1850, os físicos franceses Jean-Bernard-Léon Foucault (1819-1868) e Armand-Hippolyte-Louis Fizeau (1819-1896) -este auxiliado por L. Breguet -, em experiências distintas e que haviam sido sugeridas por Arago, mediram a velocidade da luz na água e no ar, constatando que, na água, a velocidade da luz era menor do que no ar. Não havia mais dúvida de que a teoria ondulatória havia ganhado a batalha com a teoria corpuscular. É oportuno salientar, nesse momento, que a experiência realizada por Fizeau, em 1851, na qual determinou a velocidade da luz na água em movimento, comprovou a hipótese feita por Fresnel, por volta de 1821, sobre o arrastamento parcial do éter luminífero pela matéria.

Ao finalizarmos esse pequeno trabalho sobre o formulador matemático da teoria ondulatória da luz, queremos destacar que Fresnel, além de ser um físico teórico-experimental de grande talento, por ser ainda um engenheiro por formação e por haver trabalhado em repartições de obras públicas, ocupou-se também de coisas práticas. Em 1820, desenvolveu um sistema de lentes progressivas formado por uma sucessão de anéis concêntricos, sendo cada um deles composto de uma lente simples. Como essa *lente de Fresnel* concentrava luz em feixes relativamente estreitos e era de fácil construção, ela foi utilizada em holofotes de faróis. Mais tarde, esse sistema foi utilizado em todo dispositivo que necessitava de feixes luminosos estreitos, tais como refletores, projetores, sinaleiras de tráfego terrestre, lanternas de navios, etc.

Durante o resto de sua curta vida, Fresnel foi admirado e respeitado pelos seus contemporâneos, quer franceses, quer estrangeiros. Por volta de 1823 foi eleito para a Academia Francesa de Ciências, e, em 1827, foi agraciado com a *Medalha Rumford* da “Real Society”. Young, membro dessa sociedade, incumbiu Arago de entregar essa Medalha ao seu amigo Fresnel. No entanto, quando chegou na casa de Fresnel, encontrou-o moribundo; oito dias depois, no dia 14 de julho de 1827, morria Fresnel esgotado por um trabalho sobre-humano, em Ville-d’Avray, nos arredores de Paris.

## Referências Bibliográficas

ASIMOV, T. **Os gênios da humanidade**. Bloch Editores, 1974.

BASSALO, J.M.F. A crônica da óptica clássica. **Cad. Cat. Ens. Fis.**, v. 3n. 3, p. 138-59, 1986.

BASSALO, J.M.F. A crônica da óptica clássica. **Cad. Cat. Ens. Fis.**, v. 4, n. 3, p. 140-50, 1987.

BORN, M. & WOLF, E. **Principles of optics**. Pergamon Press, 1970.

MICROPAEDIA. In: **Encyclopaedia britannica**. University of Chicago, v. 4, 1978. .

GIBERT, A. **Origens históricas da física moderna**. Fundação Galouste Gulbenkian, 1982.

GUAYDIER, P. História da física. **Biblioteca básica de ciências**. Edições 70, 1984.

HECHT, E. & ZAJAC, A. **Optics**. Addison-Wesley Publishing Company, 1979.

KISTNER, A. **Historia de la física**. Editorial Labor, 1934.

MAGIE, W.F. **A source book in physics**. McGraw-Hill Book Company, 1935.

ROSMORDUC, J. **De Tales a Einstein**. Lisboa: Caminho, 1983.

STRONG, J. **Concepts of classical optics**. W. H. Freeman and Company, 1958.

WHITTAKER, Sir E. **A history of the theorie of aether and electricity: the classical theories**. Thomas Nelson and Sons, 1951.