

Verificação Experimental das Equações de Fresnel

Emanuel Ricardo - n° 65677, Hugo Proença - n° 65683, João Martins - n° 65695, João Penedo - n° 65697

Laboratório de Complementos de Electromagnetismo e Termodinâmica, MEFT - IST 2009/10

(Dated: May 12, 2010)

Com esta actividade experimental pretende-se a determinação da **reflectividade** e da **transmissividade** da superfície de separação entre dois meios homogêneos, isotropos e não condutores (ar e polímero) para radiação monocromática no domínio do visível sujeita a polarizações paralela e perpendicular. Variando o ângulo de incidência da radiação sobre a superfície de separação, a reflectância e transmitância são calculadas com base nas **equações de Fresnel**. O índice de refração do polímero é calculado com base no ângulo de Brewster e o ângulo crítico de reflexão total.

I. EXPERIÊNCIA REALIZADA

O aparato utilizado nesta actividade experimental (Figura 1) consiste num semi-cilindro de polímero montado num goniómetro com nónio, sobre o qual irá incidir um feixe de laser polarizado. Acoplado ao braço móvel do goniómetro encontra-se um detector de radiação que será utilizado na medição das intensidades dos feixes reflectido e refractado.

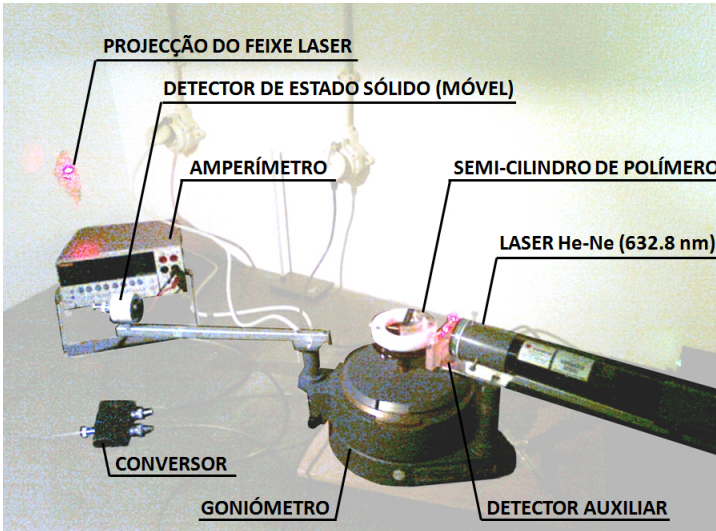


Figura 1: Fotografia-esquema do equipamento experimental

Polarizando perpendicularmente o feixe luminoso, realizam-se duas séries de medidas, uma com o feixe oriundo de um meio mais refringente (incidência sobre a superfície plana do semi-cilindro) e outra com o feixe proveniente de um meio menos refringente (incidência sobre a superfície curva do semi-cilindro). Em cada uma das séries, variar-se-á o ângulo de incidência do feixe de laser de 0° a 85°, em intervalos de 5 graus, medindo-se de seguida as intensidades dos feixes reflectido e refractado com recurso ao detector. A existência de uma polarização parcial inerente ao feixe, variável no tempo, leva à implementação de um método de determinação das intensidades que reduza a contribuição dessa mesma polarização. Tal método consiste na medição de três valores para cada valor de intensidade de feixe determinado. Tais valores consistem em duas leituras de intensidade do feixe reflectido ou refractado (I_1 e I_2) e a leitura de uma intensidade de referência (I_3), proveniente de uma reflexão parcial do feixe num momento anterior

à sua incidência no semi-cilindro¹. A intensidade do raio resultante da incidência do laser no semi-cilindro é assim calculada a partir da expressão:

$$I = \frac{I_1 + I_2}{2I_3} \quad (1)$$

A intensidade do feixe incidente é calculada retirando o semi-cilindro do goniómetro e fazendo-o incidir directamente sobre o detector. A medição de I_1 , I_2 e I_3 é realizada uma vez mais, assim como a recorrência à expressão (1) de modo a determinar-se a intensidade do feixe incidente.

Sujeitando o laser a uma polarização paralela, repetem-se os passos descritos nos dois parágrafos anteriores. Na situação de polarização paralela determinam-se igualmente os ângulos de Brewster assim como o ângulo crítico de reflexão total de modo a possibilitar o cálculo do índice de refração do semi-cilindro.

II. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Fazendo com que o laser incidisse directamente sobre o detector, mediu-se a intensidade de radiação incidente, obtendo-se os valores apresentados na Tabela I.

Tabela I: Intensidade de radiação incidente

| Polarização | Sup. de incidência | Intensidade | Erro |
|---------------|--------------------|-------------|------|
| Paralela | Ar-semi-cilindro | 6.49 | 0.05 |
| | Semi-cilindro-ar | 6.49 | 0.05 |
| Perpendicular | Ar-semi-cilindro | 7.22 | 0.06 |
| | Semi-cilindro-ar | 7.06 | 0.12 |

Posteriormente, estimou-se as intensidades dos feixes reflectido e refractado para diferentes ângulos de incidência em quatro situações diferentes (alternou-se duas polarizações diferentes, paralela e perpendicular, com dois planos de incidência, ar-semi-cilindro e semi-cilindro-ar). Por limitações de espaço, não são dispostos os valores de intensidade medidos, sendo apenas apresentados os gráficos de reflectâncias e transmitâncias construídos a partir dos mesmos.

Os ângulos de Brewster e crítico de reflexão total foram igualmente medidos, obtendo-se um valor de 34.2 graus para o ângulo de Brewster quando o feixe passa do meio mais

¹ I_3 é medido com recurso ao detector auxiliar indicado.

refringente para o menos refringente (plano de incidência semi-cilindro-ar); um ângulo de Brewster igual a 56.8 graus quando o feixe incide no plano ar-semi-cilindro; um ângulo crítico de reflexão total igual a 42.7 graus. Para os ângulos de Brewster foram adicionalmente registados os ângulos limite de detecção, tendo-se os intervalos de]56.2; 57.1[graus para o plano semi-cilindro-ar e]33.5; 34.7[graus para o plano ar-semi-cilindro.

III. ANÁLISE DE RESULTADOS

A. Determinação do índice de refração do semi-cilindro

De modo a determinar a reflectância e transmitância do par laser-semi-cilindro a partir das leis de Fresnel, foi necessário calcular o índice de refração do semi-cilindro (o índice de refração do ar considerou-se igual a 1). O parâmetro referido foi avaliado com base no ângulo de Brewster e no ângulo crítico de reflexão total.

Observando-se o ângulo de Brewster para duas situações distintas, passagem do feixe de um meio menos refringente para um meio mais refringente e vice-versa, determinou-se o índice de refração do semi-cilindro aplicando as relações (2) e (3) a cada um dos casos respectivamente.

$$n_{\text{semi-cilindro}} = \tan(\theta_b) \quad (2)$$

$$n_{\text{semi-cilindro}} = \frac{1}{\tan(\theta_b)} \quad (3)$$

Uma medição do ângulo crítico de reflexão total permitiu igualmente o cálculo de $n_{\text{semi-cilindro}}$ através das leis de Snell-Descartes.

Tabela II: Intensidade de radiação incidente

| Ângulo | Sup. de incidência | $n_{\text{semi-cilindro}}$ |
|----------|--------------------|----------------------------|
| Brewster | Ar-semi-cilindro | 1.53 |
| | Semi-cilindro-ar | 1.47 |
| Crítico | Semi-cilindro-ar | 1.48 |

Uma vez que dois dos valores se encontram bastante próximos entre si e relativamente afastados do terceiro, considerou-se $n_{\text{semi-cilindro}}$ como sendo a média dos índices de refração calculados a partir do ângulo crítico de reflexão total e do ângulo de Brewster observado quando o feixe provinha do meio mais refringente. Note-se que os valores de $n_{\text{semi-cilindro}}$ que concordam entre si provêm de ângulos registados para uma superfície de incidência comum, semi-cilindro-ar, o que nos leva a pensar que a coerência de valores se deve a imperfeições semelhantes na superfície de incidência do feixe.

B. Verificação das leis de Fresnel

Estabelecido um valor para $n_{\text{semi-cilindro}}$, procedeu-se ao cálculo dos valores de reflectância e transmitância para os

diferentes ângulos de incidência a partir das leis de Fresnel. Os valores avaliados desta forma designam-se por valores teóricos. Os valores experimentais de transmitância e reflectância foram obtidos através das intensidades registadas no amperímetro.

De modo a comparar os valores teóricos com os valores experimentais² foram construídos vários gráficos (Figuras 2-9, indicando-se em legenda as condições da análise) que avaliam as variações do quociente entre intensidade de raio transmitido e intensidade do raio incidente e do quociente entre as intensidades de raio reflectado e raio incidente com os ângulos de incidência. Estes quocientes correspondem, respectivamente, à transmitância e reflectância em estudo.

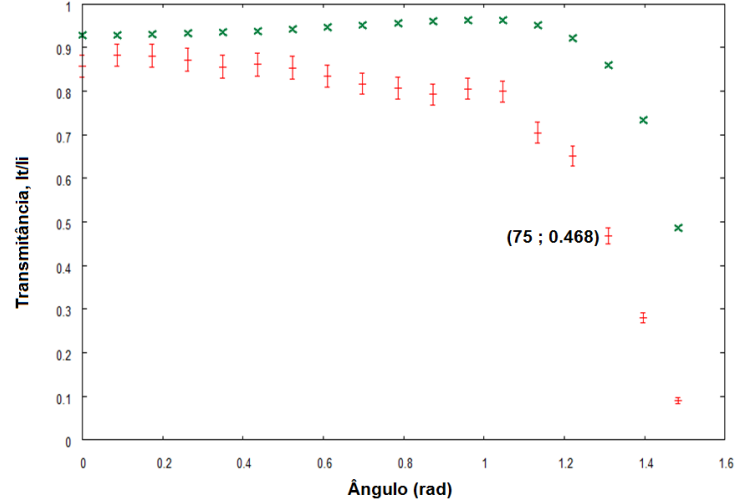


Figura 2: Transmissão, polarização paralela, face plana

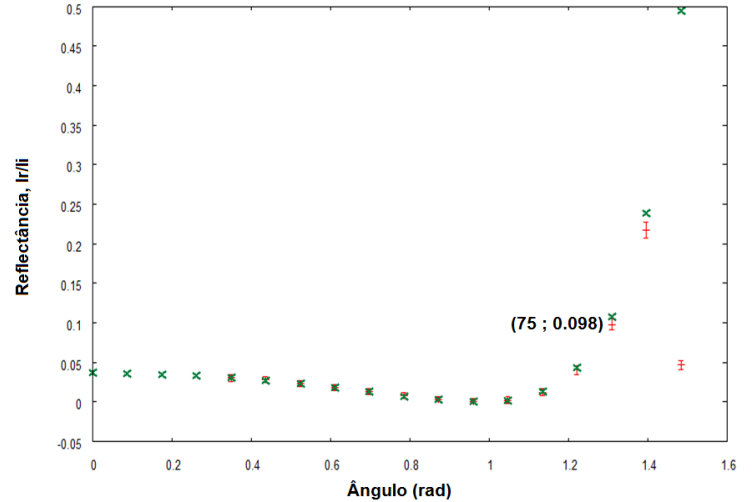


Figura 3: Reflexão, polarização paralela, face plana

Uma análise dos gráficos permite verificar que os valores teóricos são, em geral, superiores aos valores experimentais.

² Os valores teóricos apresentam-se a verde enquanto que os valores experimentais e respectivos erros se encontram representados a vermelho.

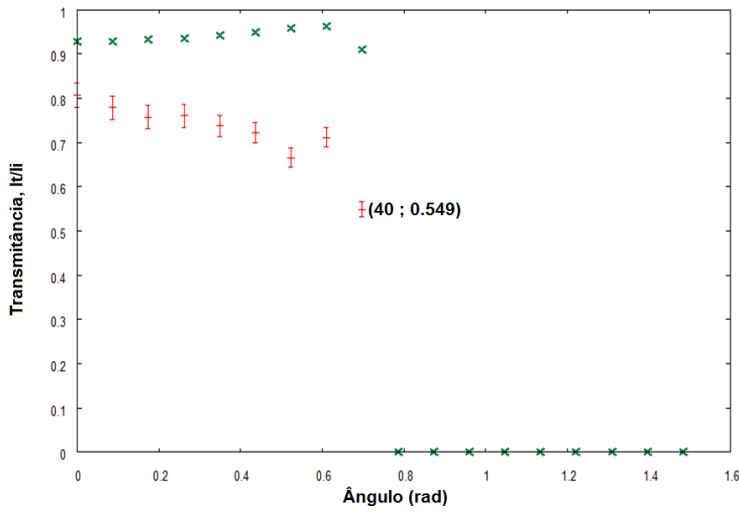


Figura 4: Transmissão, polarização paralela, face curva

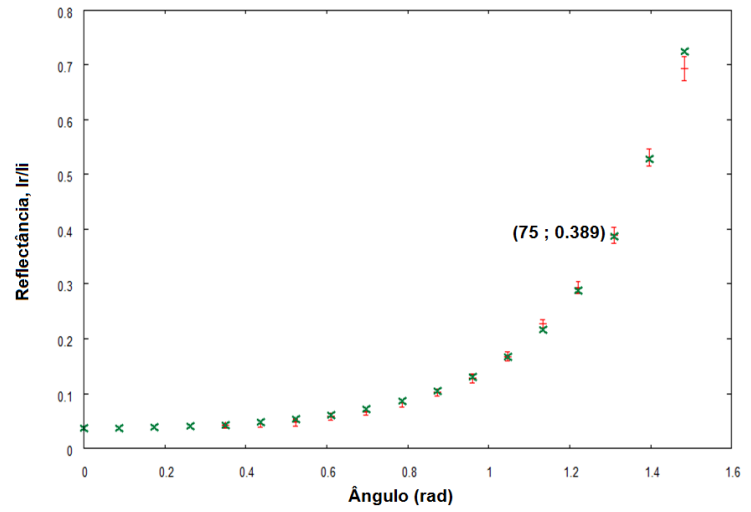


Figura 7: Reflexão, polarização perpendicular, face plana

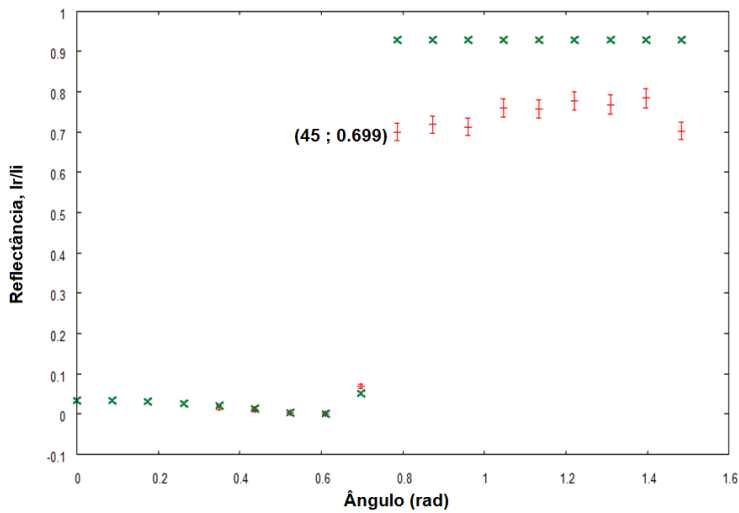


Figura 5: Reflexão, polarização paralela, face curva

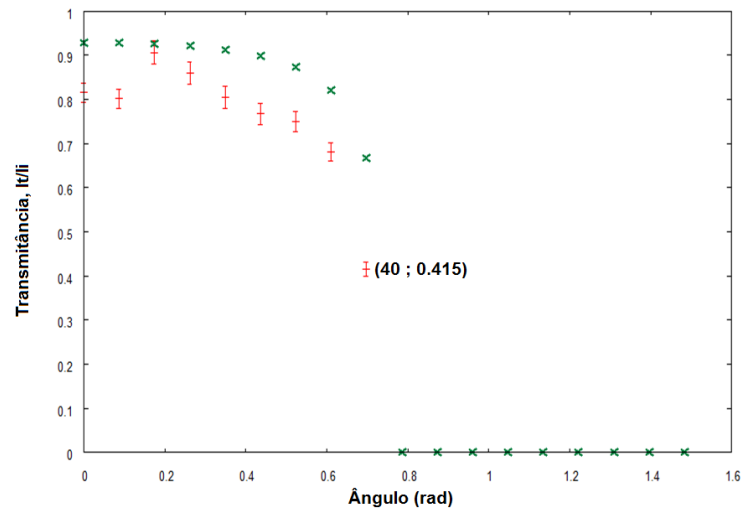


Figura 8: Transmissão, polarização perpendicular, face curva

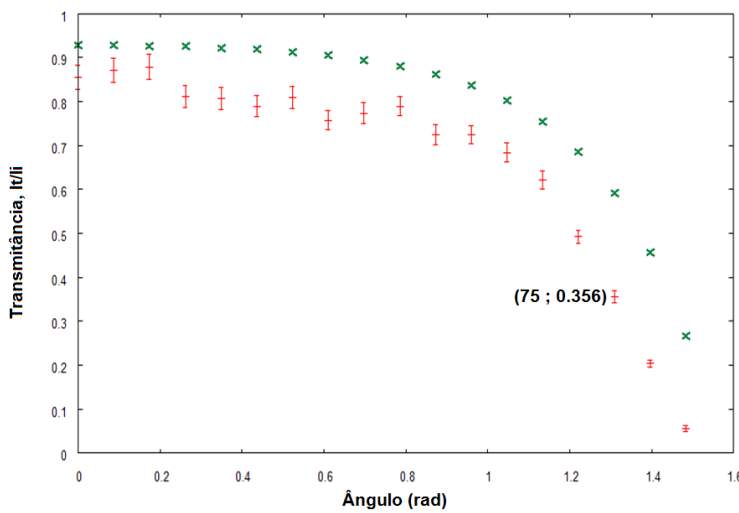


Figura 6: Transmissão, polarização perpendicular, face plana

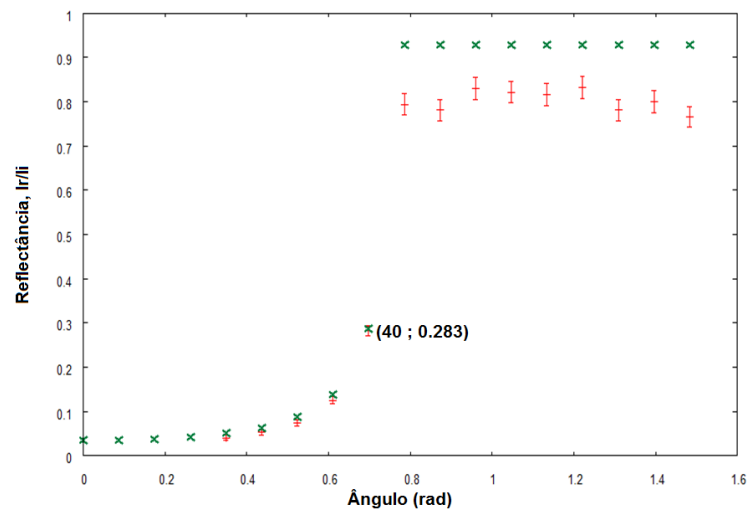


Figura 9: Reflexão, polarização perpendicular, face curva

Note-se que, à exceção do ponto correspondente a um ângulo de incidência de 40 graus sobre a superfície curva do semi-

cilindro com uma polarização paralela, todos os pontos em que o valor experimental é maior, têm o valor teórico coberto

pelo erro experimental. Igualmente importante de salientar é o facto de os pontos teóricos e experimentais, não obstante as evidentes diferenças de valor entre ambos, apresentarem sempre uma tendência semelhante, *i.e.* os dois conjuntos de valores parecem evoluir sob o efeito da mesma lei com o aumento sucessivo do ângulo de incidência do laser.

IV. CONCLUSÕES E CRÍTICA

Tendo sido possível prever os valores experimentais a partir dos modelos teóricos, pode-se dizer que com a realização desta actividade experimental foi cumprido o objectivo proposto, ou seja, a validade das equações de Fresnel foi comprovada.

O sucesso da experiência reside na semelhança entre a evolução de valores teóricos e valores experimentais para as diferentes polarizações e ordens de incidência (ar-semi-cilindro e semi-cilindro-ar) analisadas. Ressalva-se no entanto que os resultados são positivos numa vertente meramente qualitativa, uma vez que as diferenças entre pontos experimentais e pontos teóricos introduzem um considerável desvio à exactidão que desvaloriza quantitativamente os resultados referidos. A subestimação dos valores de transmitância e reflectância pode ser explicada por apenas dois factores, a não pontualidade da fonte e a existência de fenómenos ópticos no interior e superfície do semi-cilindro devido a imperfeições do mesmo.

Não sendo pontual, o feixe de laser alarga quando atravessa a fronteira entre os dois meios, o que impossibilita uma medição correcta do seu valor de intensidade, pois o detector não consegue abranger toda a largura do feixe após a sua transmissão. Esta situação foi observada sempre que se desejava analisar o feixe transmitido, o qual era inicialmente (ângulos pequenos) pontual, passando a ser uma mancha de área superior à região do detector nas medições finais (ângulos superiores). O mesmo não ocorre com os valores I_r/I_i , pois, durante o fenómeno de reflexão o feixe não atravessa nenhuma superfície, não sofrendo portanto qualquer alargamento.

As diferenças entre as reflectâncias experimental e teórica devem-se sobretudo à existência de fenómenos ópticos adicionais. Sendo provocados por imperfeições do semi-cilindro, fenómenos como absorção, reflexão e refacções que podem

ocorrer no interior do semi-cilindro ou na zona de separação semi-cilindro-ar ou ar-semi-cilindro fazem com que o feixe incidente no detector tenha uma intensidade inferior à esperada teoricamente. Esta teoria foi comprovada durante a actividade laboratorial, uma vez que foi possível observar reflexões no interior do semi-cilindro responsáveis por uma diminuição de intensidade do mesmo. O facto de se conseguir ver o “rastros” do laser também é um bom indicador de impurezas, pois, se estas não existissem, a visualização do caminho do laser seria impossível, sendo apenas possível visualizar um ponto no alvo.

Uma análise posterior da conservação de energia no processo de reflexão e refacção do laser veio a confirmar as hipóteses anteriores, na medida em que a energia experimental não se conservou. Esta não conservação resulta de uma discrepância entre a intensidade do feixe incidente e a soma de intensidades dos feixes refractado e reflectido, discrepância essa que se adequa perfeitamente às hipóteses enunciadas para explicar as diferenças entre valores teóricos e valores experimentais.

Relativamente ao ponto em que o valor experimental se superioriza em relação ao teórico, não possuindo qualquer significado físico aparente, pensa-se que esse ponto advém de uma má medição do valor da intensidade de referência. Para solucionar este problema, sugere-se um tratamento de erros que sobrestime os erros de medição, pois, na realidade, a nossa incerteza é bastante superior à introduzida pela escala digital do detector.

Esta actividade experimental poderia ser melhorada com a utilização de um semi-cilindro de polímero mais próximo do ideal, ou seja, com menos imperfeições. Além de um método de tratamento de erros que sobrestimasse os mesmos já referido anteriormente, ao nível de tratamento de resultados, este trabalho também poderia ser melhorado utilizando diferentes $n_{\text{semi-cilindro}}$ consoante a superfície de separação em análise. Esta última sugestão baseia-se na ideia introduzida na análise de resultados de que o factor de escolha de $n_{\text{semi-cilindro}}$ poderá depender de uma coerência de erros; assim, a utilização de uma diferenciação de índices de refacção poderia traduzir-se numa maior concordância entre os erros a que os valores experimentais estão sujeitos e os erros inerentes aos valores teóricos (cujo cálculo depende do índice de refacção do polímero).

[1] J. Figueirinhas, Apont. aulas teóricas (5,6 May 2010).

[2] “<http://en.wikipedia.org/wiki/Transmittance>,” Transmittance: Wikipedia art.

[3] “<http://en.wikipedia.org/wiki/Reflectivity>,” Reflecti-

vity: Wikipedia art.

[4] “http://en.wikipedia.org/wiki/Brewster's_angle,” Brewster’s Angle: Wikipedia art.