

Estudo das Equações de Fresnel

Ana Sofia Camões de Sousa | 96508

Duarte Miguel de Aguiar Pinto e Morais Marques | 96523

Isabel Maria Jaló Alexandre | 96537

Martim da Costa Graça Marques Ferreira | 96554

Grupo 5C

Objetivos

Pretende-se verificar experimentalmente as Leis de Fresnel. Para este fim, serão considerados dois meios: o ar e um semi-cilindro de polímero. Serão determinados ângulos crítico e de Brewster, o índice n de refração do material, estudadas a refletância e a transmitância de diferentes configurações e efetuados balanços energéticos.

Montagem

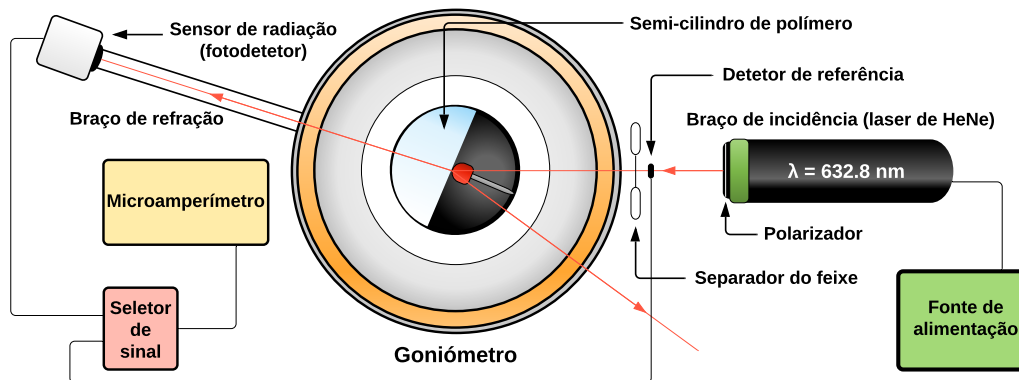


Figura 1: Esquema de blocos da montagem experimental

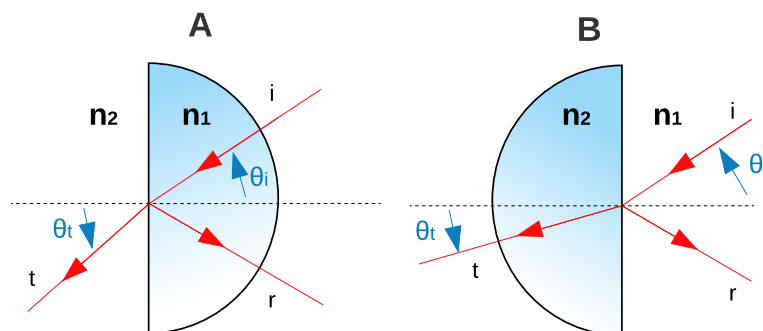


Figura 2: Alinhamentos A e B

29 de abril de 2021

Formulário

Lei de Snell-Descartes:

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad (1)$$

Ângulo crítico (alinhamento A, ambas as polarizações):

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (2)$$

$$T_{12}(0) = \frac{n_2}{n_1} \left(\frac{2n_1}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (3)$$

Lei de Lambert-Beer:

$$I(d) = I_0 e^{-\alpha d} \quad (4)$$

Polarização paralela

Ângulo de Brewster (ambos os alinhamentos):

$$\tan \theta_b = \frac{n_2}{n_1} \quad (5)$$

$$R_{1-2}(\theta_i) = \left(\frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} \right)^2 \quad (6)$$

$$T_{1-2}(\theta_i) = \frac{n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i} \left(\frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} \right)^2 \quad (7)$$

Polarização perpendicular

$$R_{1-2}(\theta_i) = \left(\frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \right)^2 \quad (8)$$

$$T_{1-2}(\theta_i) = \frac{n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i} \left(\frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \right)^2 \quad (9)$$

Alinhamento A

$$\frac{P_r}{P_i} = T_{ar-polimero}(0) \times R_{polimero-ar}(\theta_i) \times T_{polimero-ar}(0) \quad (10)$$

$$\frac{P_t}{P_i} = T_{ar-polimero}(0) \times T_{polimero-ar}(\theta_i) \quad (11)$$

Alinhamento B

$$\frac{P_r}{P_i} = R_{ar-polimero}(\theta_i) \quad (12)$$

$$\frac{P_t}{P_i} = T_{ar-polimero}(\theta_i) \times T_{polimero-ar}(0) \quad (13)$$

Procedimento experimental

1. O laser foi ligado durante cerca de 15 minutos.
2. Constatou-se que a incerteza na medição de ângulos no goniómetro é de $0^{\circ}0'30''$. Esta incerteza será considerada em todas as medições, salvo se indicado o contrário.

Polarização paralela

Alinhamento A

3. Configurou-se o polarizador de forma a ter polarização paralela.
4. Começou-se por medir a potência da luz incidente. Para tal colocou-se o prisma de forma a que a luz não passasse nele.
5. Preparou-se o aparato de forma a ter o alinhamento A.
6. Rodou-se o disco do goniómetro no qual se encontra o suporte do semi-cilindro de forma a se ter 0° (indicado na escala do goniómetro) como ângulo inicial.
7. Mediu-se o ângulo crítico: $42^{\circ}33'0'' \pm 0^{\circ}1'0''$
8. Mediu-se o ângulo de Brewster: $38^{\circ}49'30'' \pm 0^{\circ}1'0''$
9. Iniciaram-se as medidas de potência da luz refletida e da luz refratada, tendo-se como objetivo tirar valores para o ângulo de incidência de 0° a 85° , com intervalos de 5° . Para os ângulos iniciais, devido ao aparato experimental bloquear a luz refletida, não foi possível tirar valores de potência para esta luz. Para os valores iniciais, o valor de referência obtido oscilou sem estabilizar entre 13 e 14, tendo-se escolhido apresentar na tabela o valor 13.5. Tabela 1.

Medição da potência incidente:

$$M_1 = 0.233 \pm 0.0005$$

$$M_2 = 0.232 \pm 0.0005$$

$$M_{ref} = 0.000135 \pm 0.000010$$

θ_i	θ_t			θ_r		
	$M_1 \times 10^{-3}$	$M_{ref} \times 10^{-5}$	$M_2 \times 10^{-3}$	$M_1 \times 10^{-3}$	$M_{ref} \times 10^{-5}$	$M_2 \times 10^{-3}$
0°	140	13.5	140	-	-	-
5°	158	13.5	158	-	-	-
10°	162	13	161	-	-	-
15°	158	13.5	157	-	-	-
20°	201	5300 ± 100	200	-	-	-
25°	187	-1800 ± 100	186	-	-	-

Tabela 1: Potências de transmissão e reflexão em função do ângulo de incidência medidos - alinhamento A, polarização paralela

10. As incertezas seriam 0.5×10^{-3} para M_1 e M_2 e 1×10^{-5} para M_{ref} , dado este último valor oscilar.

11. O detector de referência estava mal alinhado, pelo que foi reiniciado o processo de obtenção de valores. Verificou-se que a partir dos 20° , tornou-se possível medir a potência da luz refletida, tendo sido necessário baixar o braço onde está o detector para conseguir medir esta potência. Foi então necessário ajustar o braço consoante a medida a tirar seria o transmitido ou o refletido, sendo isto uma possível fonte de erros. Após o ângulo crítico, só é possível medir valores de potência da luz refletida. Durante as medições, o laboratório foi mantido com a mínima luminosidade possível. Tabela 2.

Medição da potência incidente:

$$M_1 = (245 \pm 0.5) \times 10^{-3}$$

$$M_{ref} = (-581 \pm 1) \times 10^{-4}$$

$$M_2 = (240 \pm 0.5) \times 10^{-3}$$

θ_i	θ_t			θ_r		
	$M_1 \times 10^{-3}$	$-M_{ref} \times 10^{-4}$	$M_2 \times 10^{-3}$	$M_1 \times 10^{-3}$	$-M_{ref} \times 10^{-4}$	$M_2 \times 10^{-3}$
0°	183	578	181	-	-	-
5°	191	575	187	-	-	-
10°	197	566	197	-	-	-
15°	189	550	190	-	-	-
20°	181	543	182	3.74	535	3.76
25°	174	565	170	2.64	550	2.66
30°	176	565	175	1.04	535	1.03
35°	172	532	174	0.42	506	0.42
40^{***}	103	508	104	13.3	480	13.2
45°	-	-	-	128	408	129
50^*	-	-	-	128	413	128
55°	-	-	-	124	418	122
60°	-	-	-	121	422	120
65^{***}	-	-	-	109	423	110
70^{**}	-	-	-	95.4	427	95.2
75°	-	-	-	122	442	123
80°	-	-	-	162	572	159
85°	-	-	-	108	444	108

Tabela 2: Potências de transmissão e reflexão em função do ângulo de incidência medidos - alinhamento A, polarização paralela

Verificou-se algum "espalhamento" ou difusão do laser em certas medidas. Foram sinalizadas com * (pouco), ** (algum) e *** (muito). Esta notação será adotada no restante decorrer do trabalho.

12. Para os valores de M_1 e M_2 foi considerada como incerteza metade do menor algarismo apresentado. Para M_{ref} , como essa medida oscilava consideravelmente, considerou-se o último algarismo como incerteza. Estas incertezas serão consideradas nas medições seguintes, salvo exceções mencionadas.

Alinhamento B

13. Procedeu-se à realização da experiência com a polarização paralela mas para o alinhamento B.
14. Mediu-se um intervalo onde se encontraria o ângulo de Brewster, dado se revelar impossível determiná-lo ao certo: $54^{\circ}58'0''$ a $57^{\circ}12'0''$.
15. Novamente, mediu-se a potência da luz incidente e procedeu-se à medição das potências da luz refratada e refletida fazendo variar o ângulo de incidência de 0° a 85° , com intervalos de 5° . Durante as medições, o laboratório foi mantido com a mínima luminosidade possível. Tabela 3.

Medição da potência incidente:

$$M_1 = (181 \pm 0.5) \times 10^{-3}$$

$$M_{ref} = (-429 \pm 1) \times 10^{-4}$$

$$M_2 = (180 \pm 0.5) \times 10^{-3}$$

θ_i	θ_t			θ_r		
	$M_1 \times 10^{-3}$	$-M_{ref} \times 10^{-4}$	$M_2 \times 10^{-3}$	$M_1 \times 10^{-3}$	$-M_{ref} \times 10^{-4}$	$M_2 \times 10^{-3}$
0°	163	562	164	-	-	-
5°	184	565	184	-	-	-
10°	200	566	201	-	-	-
15°	201	572	200	-	-	-
20°	200	572	200	-	-	-
25°	203	582	204	4.96	400	4.97
30°	159	454	162	5.43	520	5.44
35°	200	565	202	4.54	542	4.54
40°	200	574	199	3.08	548	3.09

Tabela 3: Potências de transmissão e reflexão em função do ângulo de incidência medidos - alinhamento B, polarização paralela

16. Mudou-se de experimentalista, a montagem ficou inalterada. Tabela 4.

θ_i	θ_t			θ_r		
	$M_1 \times 10^{-3}$	$-M_{ref} \times 10^{-4}$	$M_2 \times 10^{-3}$	$M_1 \times 10^{-3}$	$-M_{ref} \times 10^{-4}$	$M_2 \times 10^{-3}$
45°	161	423	162	1.84	425	1.85
50°	163	421	162	1.11	526	1.31
55°	145	425	143	0.65	466	0.63
60°	157	461	161 ± 1	1.05	483	1.06
65°	149	505	150	1.01 ± 0.01	529	1.25
70^{**}	123	542	127	13.5	535	11.6
75^{**}	114	539	114	15.2	530	15.5

Tabela 4: Potências de transmissão e reflexão em função do ângulo de incidência medidos - alinhamento B, polarização paralela

29 de abril de 2021

17. Verificou-se, após recolha dos valores acima, que estaria a ser seguido o feixe refletido "errado", dado existir separação de feixes.
18. Foi ajustado o polarizador de forma a apenas existir um feixe refletido. Os valores foram recolhidos novamente. Tabela 5.

θ_i	θ_t			θ_r		
	$M_1 \times 10^{-3}$	$-M_{ref} \times 10^{-4}$	$M_2 \times 10^{-3}$	$M_1 \times 10^{-3}$	$-M_{ref} \times 10^{-4}$	$M_2 \times 10^{-3}$
45°	149	530	147	2.0	565 ±2	2.03
50°	190 ±1	526	186	1.0	559	1.0
55°	184	527	184	0.35	542	0.35
60°	173	514	176	0.58	519	0.58
65°*	133	412	134	2.4	430	2.5
70°**	117	402	116	7.1	401	7.0
75°**	92	405	92	17.5	406	17.4
80°***	57	407	57	38.3	407	38.3
85°***	16.3	406	16.2	82.2	402	82.2

Tabela 5: Potências de transmissão e reflexão em função do ângulo de incidência medidos - alinhamento B, polarização paralela

Polarização perpendicular

Alinhamento B

19. Adaptou-se a montagem, ajustando o polarizador e a posição do prisma.
20. Determinou-se, novamente, a potência incidente, seguida das determinação das potências de transmissão e reflexão para ângulos de 0° a 85°, com incrementos de 5°. Tabela 6.

Medição da potência incidente:

$$M_1 = (176 \pm 0.5) \times 10^{-3}$$

$$M_{ref} = (-221 \pm 1) \times 10^{-4}$$

$$M_2 = (171 \pm 0.5) \times 10^{-3}$$

θ_i	θ_t			θ_r		
	$M_1 \times 10^{-3}$	$-M_{ref} \times 10^{-4}$	$M_2 \times 10^{-3}$	$M_1 \times 10^{-3}$	$-M_{ref} \times 10^{-4}$	$M_2 \times 10^{-3}$
0°	201	280	204	-	-	-
5°	199	273	200	-	-	-
10°	211	266	205	-	-	-
15°	198	251	197	-	-	-
20°	190	238	188	9.17	222	9.04
25°	161	215	163	9.6	208	9.0
30°	160	215	160	9.90	207	9.93
35°	136	214	134	11.6	209	11.3
40°	152	216	151	13.3	216	13.3
45°	128	213	127	15.4	216	15.5
50°	127	210	123	18.5	218	18.8
55°	116	209	117	23.3	218	23.2
60°	156	252	149	30.5	237 ± 2	27.5
65°*	118	206	115	37	210	36.6
70°*	98	204	98	47.0	202	46
75°**	85	266	82	80	250	75
80°***	36	212	35	91	207	91
85°***	10.9	204	10.9	128	206	129

Tabela 6: Potências de transmissão e reflexão em função do ângulo de incidência medidos - alinhamento B, polarização perpendicular

Alinhamento A

21. Adaptou-se a montagem, ajustando a posição do prisma.

22. Determinou-se o ângulo crítico: 42°36'0".

23. Determinou-se, novamente, a potência incidente, seguida das determinação das potências de transmissão e reflexão para ângulos de 0° a 85°, com incrementos de 10°, em vez de 5°, por falta de tempo. Tabela 7.

Medição da potência incidente:

$$M_1 = (186 \pm 0.5) \times 10^{-3}$$

$$M_{ref} = (-204 \pm 1) \times 10^{-4}$$

$$M_2 = (185 \pm 0.5) \times 10^{-3}$$

θ_i	θ_t			θ_r		
	$M_1 \times 10^{-3}$	$-M_{ref} \times 10^{-4}$	$M_2 \times 10^{-3}$	$M_1 \times 10^{-3}$	$-M_{ref} \times 10^{-4}$	$M_2 \times 10^{-3}$
0°**	127	205	128	-	-	-
10°	147	205	147	-	-	-
20°	156	208	134	7.8	218	3.6
30°	13.6	229	113	16.3	252	16.8
30° _{rep}	188	275	188	19.6	288	19.6
40°	89.9	269	89.6	67.2	279	66.5
50°	-	-	-	189.5	282	191
60°	-	-	-	151	288	151
70°	-	-	-	166	281	164
80°	-	-	-	154	276	154

Tabela 7: Potências de transmissão e reflexão em função do ângulo de incidência medidos - alinhamento A, polarização perpendicular

Ocorreu uma anomalia na primeira determinação para o ângulo 30°, pelo que foram repetidas as medições e a original desconsiderada.

Medidas repetidas

24. Devido a inconsistências na determinação do n foi determinado novamente o ângulo de Brewster para o Alinhamento A, polarização paralela: 34°5'30". Constatou-se que na determinação inicial terá ocorrido uma leitura incorreta do ângulo no goniômetro ou na determinação do ângulo em si, dado este novo valor ser consistente com os restantes dois determinados. O anterior é desconsiderado no tratamento dos dados.

Análise dos dados

Para os índices de refração obtiveram-se valores bastante precisos (tabela 8). Para a determinação dos valores teóricos das potências que figuram nos gráficos abaixo, foi considerada a média destes valores: 1.4789 ± 0.0004 .

Alinhamento A - polarização paralela	
Ângulo crítico	1.4821 ± 0.0003
Ângulo de Brewster	1.4775 ± 0.0005
Alinhamento B - polarização paralela	
Ângulo de Brewster	1.4788 ± 0.0005
Alinhamento A - polarização perpendicular	
Ângulo crítico	1.4774 ± 0.0003

Tabela 8: Valores de n determinados

Abaixo encontram-se representações gráficas das medidas efetuadas, em comparação com os valores teóricos que seriam de esperar obter. Notam-se claras divergências. Alguns dados obtidos parecem seguir, grosso modo, as tendências que seriam de esperar (crescimento, diminuição) mas outros parecem ser incoerentes. Para efetuar conclusões significativas, seriam necessários mais dados ou um método distinto, de forma a efetuar alguma comparação.

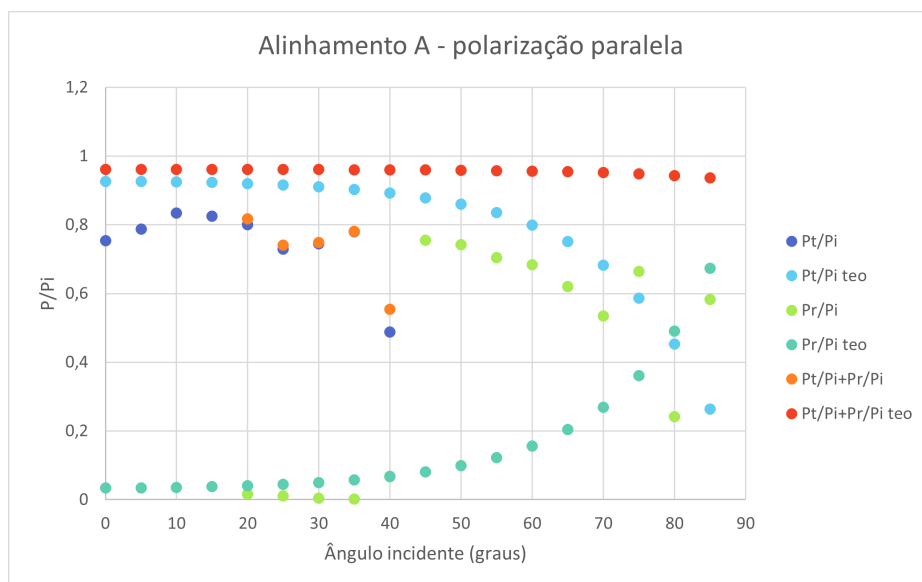


Figura 3: Medições efetuadas e valores teóricos correspondentes - alinhamento A, polarização paralela, tabela 2

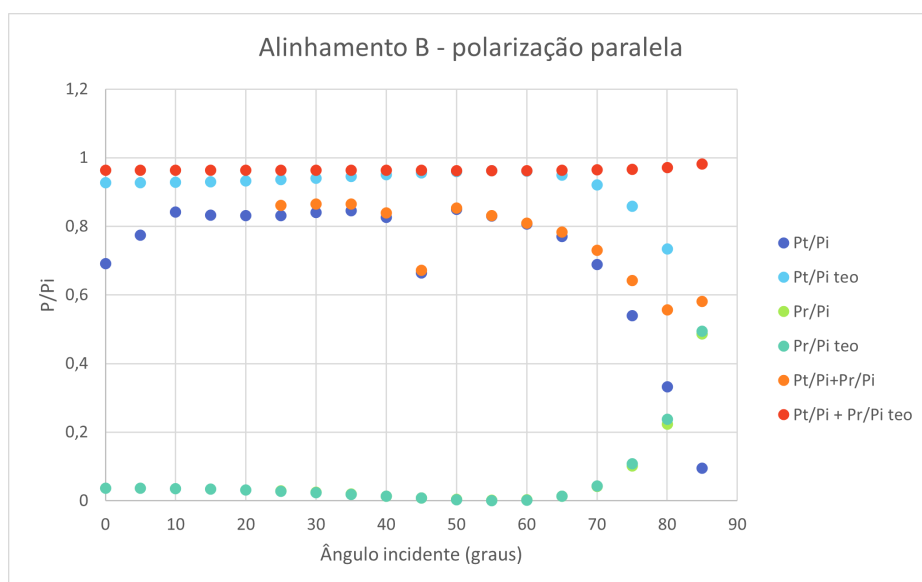


Figura 4: Medições efetuadas e valores teóricos correspondentes - alinhamento B, polarização paralela, tabelas 3 e 5

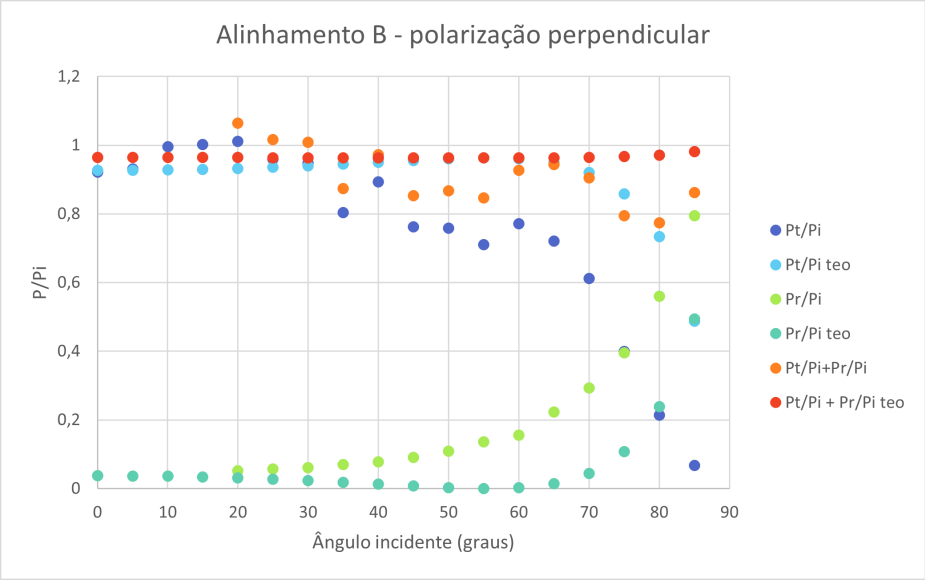


Figura 5: Medições efetuadas e valores teóricos correspondentes - alinhamento B, polarização perpendicular, tabela 6

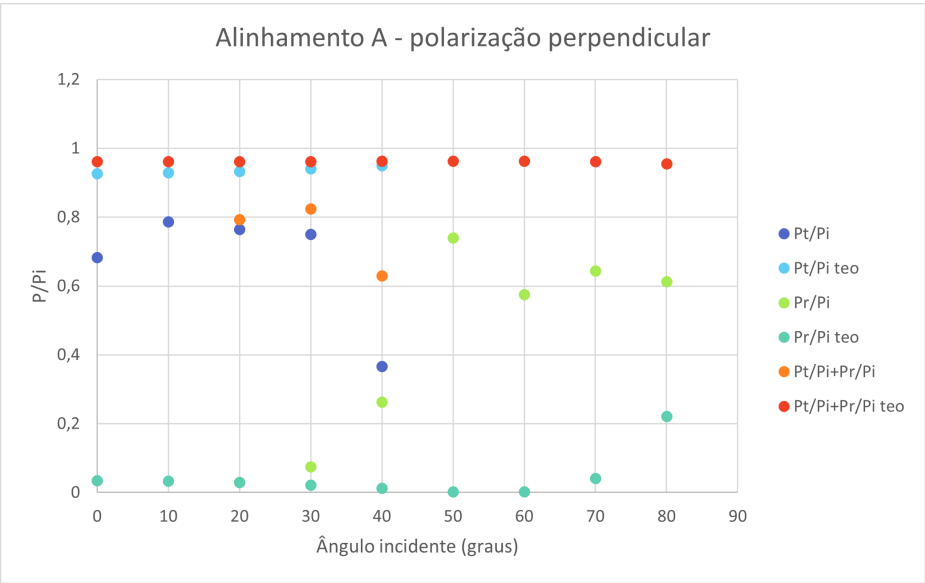


Figura 6: Medições efetuadas e valores teóricos correspondentes - alinhamento A, polarização perpendicular, tabela 7