

## **MEDIDAS DE BRDF EM AMOSTRAS DE ALUMÍNIO ANODIZADO PRETO**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
(PIBIC/CNPq/INPE)**

**Luiz Guilherme Oliveira Santos (UNIFESP, Bolsista PIBIC/CNPq)**

**E-mail: [luiz.guilherme.sjc@gmail.com](mailto:luiz.guilherme.sjc@gmail.com)**

**Luiz Angelo Berni (LAS/CTE/INPE, Orientador)**

**E-mail: [berni@las.inpe.br](mailto:berni@las.inpe.br)**

**Julho de 2016**

## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi realizar medidas da refletância de amostras de alumínio anodizado preto com diferentes acabamentos. Essa refletância pode ser definida pela função “Bidirectional Reflectance Distribution Function” (BRDF) e foi obtida de amostras com 50mm de diâmetro. Também foi medida a refletância total em um espectrofotômetro utilizando amostras de 24mm de diâmetro. As amostras foram preparadas previamente, usando lixas de diferentes granulometrias para que apresentassem diferentes rugosidades. Para o cálculo da BRDF das amostras, foram obtidos dados em diferentes ângulos de incidência da fonte de luz para um comprimento de onda de 650nm. Para efeito de comparação, também foram realizadas medidas com outros materiais como, grafite e tintas. Atualmente, os dados estão sendo preparados para serem utilizados no programa de simulação ZEMAX.

## **ABSTRACT**

The objective of this study was to measure the reflectance of black anodized aluminium samples with different finishes. This reflectance can be defined by the function “Bidirectional Reflectance Distribution Function” (BRDF) and was obtained for samples with 50mm of diameter. Also it was measured the total reflectance in a spectrofotometer using samples with 24mm of diameter. The samples were prepared previously with different sandpapers of different particle sizes to submit different roughness. To calculate the BRDF of samples, data were obtained at different angles of incidence of the light source at wavelength of 650nm. For comparison, also it was carried out measures with other materials such as graphite and inks. Currently, data is being prepared for use in ZEMAX simulation program.

## LISTA DE TABELAS

	<b>Pág.</b>
<b>3.1</b> Resultado da TIS obtida no MatLab com incidência de luz à $15^\circ$	19
<b>3.2</b> Resultado da TIS obtida no MatLab com incidência de luz à $30^\circ$	19

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>2.1</b> Esquemático do sistema de aquisição de dados montado no LAS/CTE	8
<b>2.2</b> Esfera integradora utilizada no espectrofotômetro	11
<b>2.3</b> Dados obtidos do sistema montado no LAS/CTE	12
<b>2.4 (a)</b> Cabeçalho de identificação dos dados	13
<b>2.4 (b)</b> Organização dos dados para leitura no programa ZEMAX	13
<b>2.5</b> Gráfico gerado no MatLab referente a amostra padrão	14
<b>2.6</b> Modelo da simulação no ZEMAX	15
<b>2.7 (a)</b> Leitura no detector hemisférico	16
<b>2.7 (b)</b> Leitura no detector plano	16
<b>3.1</b> Gráfico da refletância das amostras anodizadas	17
<b>3.2</b> Refletância do grafite, da tinta e da tinta para satélite	18

## SUMÁRIO

	<b>Pág.</b>
<b>1. Introdução</b>	7
<b>2. Materiais e Métodos</b>	8
2.1 Sistema de Medida da BRDF	8
2.2 Medida da Refletância em Espectrofotômetro	11
2.3 Modelo dos arquivos para MatLab e ZEMAX	12
2.4 Cálculo da BRDF e simulação no ZEMAX	14
<b>3. Análise dos Resultados</b>	17
3.1 Resultado das medidas realizadas no espectrofotômetro	17
3.2 Resultados obtidos no MatLab	18
<b>4. Conclusão</b>	20
<b>5. Referências</b>	20
<b>6. Trabalhos Submetidos</b>	21

## 1 – INTRODUÇÃO

A luz que incide em um material pode se comportar de três formas distintas, sendo elas, a transmitância, a refletância ou absorbância. Isso dependerá das características da luz incidida, além da composição e características do material. A luz refletida no material pode ser descrita pela “Bidirectional Reflectance Distribution Function” (BRDF), e ela é utilizada no equipamento montado pelo LAS/CTE [1]. A BRDF a ser medida, em uma superfície homogênea, é dependente do comprimento de onda utilizado, do ângulo de incidência e reflexão da luz em relação ao eixo zênite e do ângulo de incidência e reflexão da luz em relação à superfície do plano azimutal [1].

Dependendo da superfície do material, se ela é mais rugosa ou mais lisa, a luz incidente no mesmo se comportará de forma diferente. Este trabalho tem como objetivo observar o comportamento da BRDF em amostras de alumínio anodizado com rugosidades diferentes. Estas amostras foram preparadas previamente, passando por processos de lixamento e anodização orgânica [2]. A anodização orgânica é um processo pelo qual é formado um filme de óxido sobre a superfície do material, sendo esse processo feito por meio de banho eletrolítico. Foram preparadas também amostras com acabamento com tinta preta comum, com tinta preta usada em satélites e uma amostra de grafite, sendo estas com 50 mm de diâmetro. As rugosidades de todas as amostras foram medidas em um perfilômetro óptico [2].

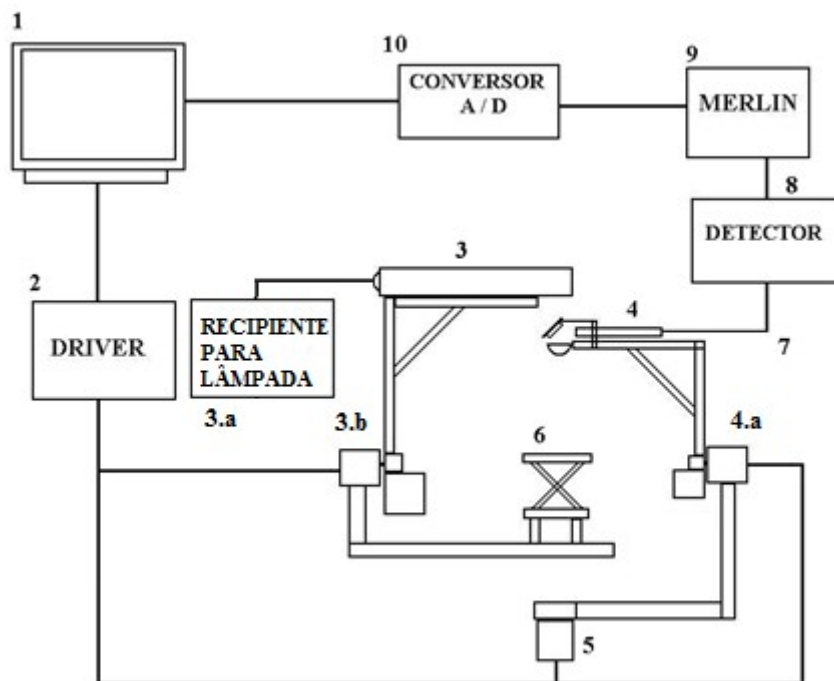
Os dados foram também analisados no ZEMAX. O ZEMAX é um programa de simulação óptica em que possibilita a análise, o modelamento e até mesmo auxilia no desenvolvimento de sistemas ópticos[3]. O “Total Integrated Scattering” (TIS) é a medida da quantidade de luz total que é refletida ou transmitida da superfície de uma amostra[4].

## 2 – MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 – Sistema de medida da BRDF

O sistema utilizado para realizar a medida da BRDF foi montado pelo LAS/CTE [1][2]. Houve mudanças no sistema de iluminação para diminuir a luz espúria e para obter um feixe mais uniforme sobre a amostra. A lâmpada dicróica foi retirada do braço e foi transferida para o interior de uma caixa. Um guia ótico líquido transmite a luz da caixa até o braço de iluminação. Pode-se observar o esquemático do sistema de aquisição na figura 2.1 abaixo:

**Figura 2.1:** Esquemático do sistema de aquisição de dados montado no LAS/CTE.



Onde:

1. Computador para controle do sistema;
2. Driver para controle dos motores de passo;



3. Eixo com a fonte de iluminação, composto por: a) caixa com lâmpada dicróica de 50W e; b) motor de passo que move o eixo no ângulo zênite;
4. Eixo com o sensor; a) motor de passo que move o eixo no ângulo zênite;
5. Eixo com o movimento azimutal do sensor;
6. Mesa ajustável onde são colocadas as amostras;
7. Fibra ótica;
8. Detector, chopper e filtro;
9. Sistema de aquisição de sinal;
10. Sistema para conversão em sinal digital.

Foi feita a aquisição de dados para as amostras de alumínio anodizado com acabamentos com a lixa de 1200 e a torneada, e também das amostras de grafite, de tinta preta e tinta para satélite. Foi utilizado o ângulo de incidência de luz de 30°. No ângulo zênite, o sensor foi disposto no intervalo de -70° à 70°, fazendo uma leitura a cada 2°. O sensor também se deslocava no eixo azimutal, sendo seu mínimo no ponto inicial 0° e seu máximo no ângulo de 170°, se movendo a cada 20° para aquisição dos dados. Foi colocado um intervalo de 1000 ms para a parada do sensor antes que realizasse a leitura, para que fosse minimizada uma possível interferência pela vibração do mesmo ao ser medida a refletância das amostras. Foram feitas medidas primeiramente para o comprimento de onda de 650,5 nm. No MatLab, a BRDF foi calculada fazendo uso da Equação 1 abaixo:

$$BRDF = \text{Dados} * Rref * \cos(\text{Thetaref}) / (Vref * \cos(\text{AngSensor})) \quad (1)$$

Sendo:

*Dados* = medida obtida pelo sensor no sistema de aquisição;

$Rref$  = Fator de refletância da amostra padrão, sendo este valor tabelado, dividido por pi;

$Thetaref$  = Ângulo de incidência da luz para medida da amostra padrão, que nesse caso foi de  $8^\circ$ . É necessária a transformação de graus para radianos;

$Vref$  = Medida da voltagem obtida do padrão no ângulo  $Thetaref$  ( $8^\circ$ ) e com o sensor à  $-Thetaref$  ( $-8^\circ$ );

$AngSensor$  = Ângulo de leitura do sensor em radianos.

O  $Vref$  foi obtido normalizando-o de acordo com a escala de saída utilizada para se fazer a medida do padrão nas condições citadas. Assim, fazendo uso da Equação 2 abaixo:

$$Vref = (MedPad*10)/Escala \quad (2)$$

Onde:

$MedPad$  = Medida em Volts obtida no Detector;

$Escala$  = Escala de proporção escolhida para se realizar as medidas. Na saída, a escala de máximo escolhida será o equivalente a 10V.

Para o calculo da TIS das amostras no MatLab foi feito uso da expressão abaixo:

$$TIS = \sum [Dados * \cos(AngSensor) * \sin(AngSensor)] * \Delta Sensor * \Delta Mesa \quad (3)$$

Onde:

$\Delta Sensor$  = É a variação do ângulo do sensor para a aquisição de dados, em radianos;

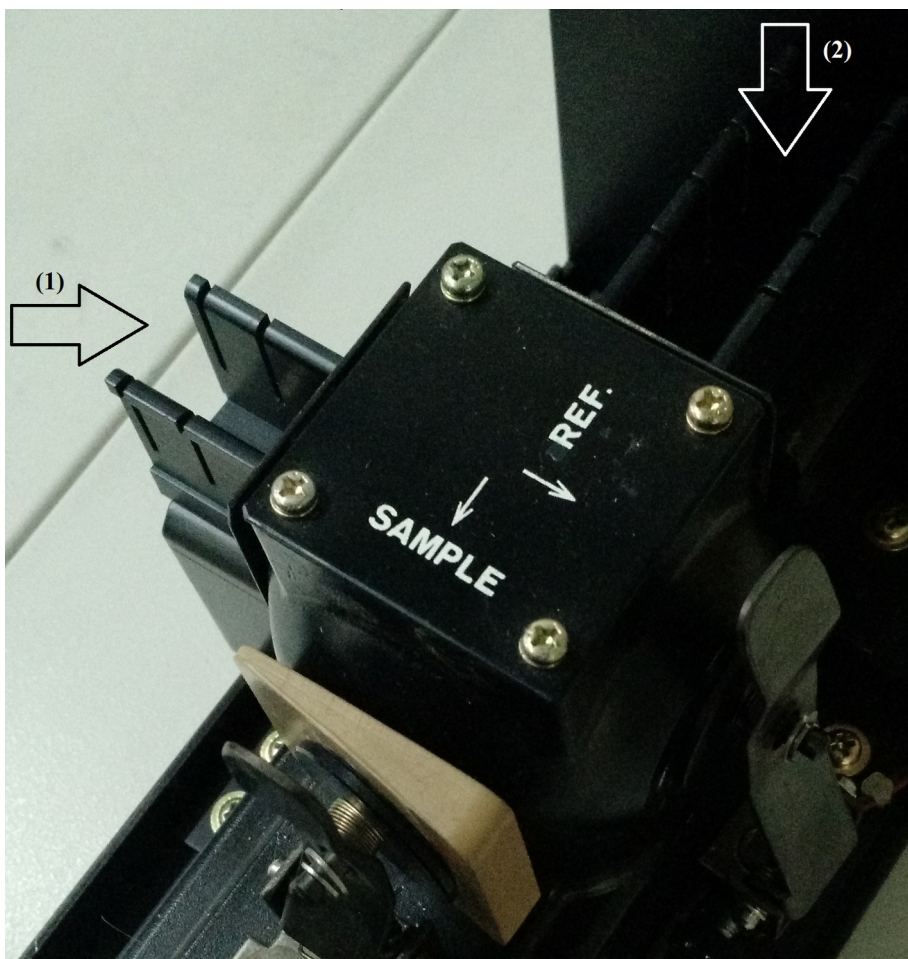
$\Delta Mesa$  = É a variação do ângulo da mesa para a aquisição de dados, também em radianos.

Os *Dados* e o *AngSensor* são os mesmos utilizados na Equação (1).

## 2.2 – Medida da Refletância em Espectrofotômetro

A porcentagem da luz refletida pela amostra por comprimento de onda foi medida em um espectrofotômetro modelo U-3501. Enquanto no sistema para as amostras de 50mm se mede a refletância em uma direção específica, dependente do ângulo de incidência da luz e do ângulo do sensor, no espectrofotômetro é medida a luz refletida integrada, transmitida ou absorvida em todas as direções de uma só vez em cada comprimento de onda. Para isso, foi utilizada uma esfera integradora, mostrada na figura abaixo:

**Figura 2.2:** Esfera integradora utilizada no espectrofotômetro.



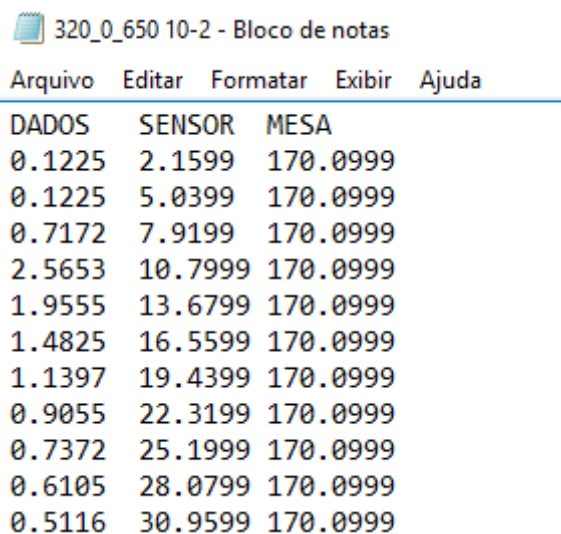
Na esfera integradora, a seta (1) indica a entrada da luz na faixa de comprimentos de onda escolhida para se realizar a medida da refletância. Neste caso, foi

utilizada a faixa de 250 nm à 950 nm. Na seta (2) é indicada a onde é realizada a medida. Foi feita a calibração do equipamento fazendo uso de duas amostras padrão, que continham aproximadamente a mesma dimensão das amostras anodizadas (diâmetro de 24x6 mm). Elas foram colocadas nas posições de “*Sample*” e “*Ref*” indicadas na figura 2.2. Em seguida, na posição definida como “*Sample*” no equipamento, foram sendo colocadas as amostras anodizadas para realizar as medidas, enquanto na outra posição, “*Ref*”, foi mantida uma das amostras padrão. Além das amostras anodizadas, foram realizadas as medidas das amostras de grafite, com tinta preta e com a tinta usada em satélite [5].

### 2.3 – Modelo dos arquivos para MatLab e ZEMAX

O arquivo gerado ao se realizar a medida da refletância é carregado diretamente pelo algoritmo feito no MatLab, sendo ele formado pelos dados dos ângulos do sensor, da mesa e pelos dados lidos. Uma parte desta tabela é mostrada na figura 2.3 abaixo.

**Figura 2.3:** Dados obtidos do sistema montado no LAS/CTE.



DADOS	SENSOR	MESA
0.1225	2.1599	170.0999
0.1225	5.0399	170.0999
0.7172	7.9199	170.0999
2.5653	10.7999	170.0999
1.9555	13.6799	170.0999
1.4825	16.5599	170.0999
1.1397	19.4399	170.0999
0.9055	22.3199	170.0999
0.7372	25.1999	170.0999
0.6105	28.0799	170.0999
0.5116	30.9599	170.0999

Na tabela no formato “txt” mostrada na figura acima, vê-se identificado os dados e como são dispostos. Para a simulação no ZEMAX, os dados precisaram ser organizados de modo que o programa pude-se lê-los. Foi feito um cabeçalho para a identificação dos dados, mostrado na figura 2.4(a), e a organização dos dados para leitura como na figura 2.4(b).

**Figura 2.4:(a)** Cabeçalho de identificação dos dados.

```

padraobrd601 - Bloco de notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
# Medidas com padrao_15_601
#25 de fevereiro de 2016
#
#Ângulo de incidência da luz: 15°
#Min. e Máx. do sensor: -70° ---> 70°
#Intervalo do sensor : 5°
#Min. e Máx. da mesa: 0° ---> 170°
#Intervalo da mesa: 20°
#Tempo de parada do sensor: 1000 ms
#Escala utilizada na saída (Vout): entrada = 100mV ---> saída = 10V
#Range do mostrador: 00,00
#Comprimento de onda: 601,5 nm
#Filtro: Não
#Padrão incidencia: 8°
#Padrão leitura: -8°
#Padrão FatorRef1.: 0.989      Vref.:2.7 V
#TIS calculado = 1.0096
    
```

**(b)** Organização dos dados para leitura no programa ZEMAX.

```

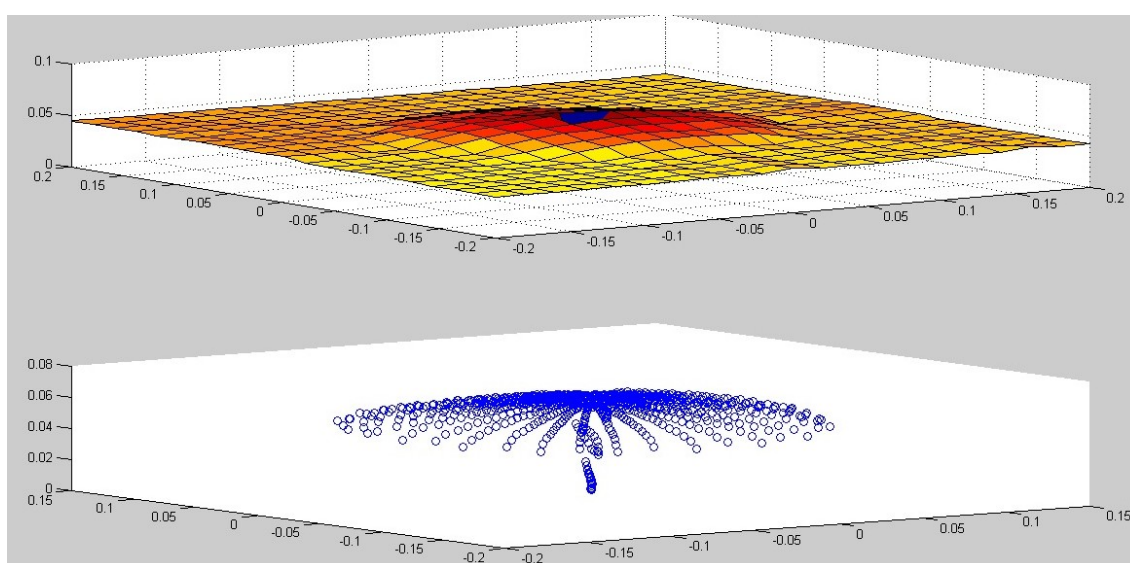
padraobrd601 - Bloco de notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
Source Measured
Symmetry PlaneSymmetrical
SpectralContent Monochrome
ScatterType BRDF
SampleRotation 1
0
AngleOfIncidence 1
15
ScatterAzimuth 11
0 9.9 18.9 38.7 59.4 79.2 99.0 119.7 139.5 160.2 180.0
ScatterRadial 15
0.72 5.12 10.15 15.19 20.23 25.27 30.31 35.35 40.39 45.43 50.47 55.51 60.55 65.59 69.84

Monochrome
DataBegin
TIS 1.00
0.23788 0.23686 0.23878 0.24211 0.24687 0.25393 0.26554 0.27797 0.2923 0.31171 0.33459 0.36601 0.40575 0.4536 0.50481
0.23788 0.23943 0.24183 0.24579 0.25216 0.26043 0.27081 0.28214 0.30004 0.32172 0.34797 0.38121 0.42136 0.4755 0.52762
0.23789 0.23826 0.24043 0.24523 0.25159 0.25916 0.26945 0.28251 0.30077 0.32302 0.34979 0.38368 0.42598 0.48132 0.5309
0.23789 0.2405 0.24253 0.24562 0.25225 0.25893 0.26947 0.28091 0.29775 0.31805 0.34234 0.37085 0.41196 0.46146 0.5244
0.23731 0.23736 0.24018 0.24411 0.24977 0.25824 0.26856 0.28185 0.29933 0.31982 0.3458 0.37955 0.42198 0.4729 0.52273
0.23731 0.24082 0.24253 0.24382 0.24988 0.25702 0.26684 0.27931 0.29339 0.31378 0.33757 0.36703 0.40192 0.44755 0.50306
0.23871 0.24021 0.24188 0.24579 0.25219 0.25943 0.26919 0.28187 0.2967 0.31691 0.33947 0.36954 0.40664 0.45338 0.49492
0.23871 0.23795 0.23992 0.24325 0.24804 0.25395 0.26302 0.2738 0.28717 0.30466 0.32542 0.35194 0.38621 0.42637 0.47368
0.23676 0.23727 0.23862 0.24216 0.24644 0.25354 0.26229 0.27452 0.28811 0.30719 0.3297 0.35693 0.39145 0.43243 0.46869
0.23676 0.23481 0.23696 0.2394 0.2443 0.2511 0.26073 0.27101 0.2842 0.30153 0.32196 0.35096 0.38179 0.41919 0.46467
0.23562 0.2355 0.23853 0.24138 0.24844 0.25539 0.26458 0.27627 0.29073 0.30802 0.33281 0.35992 0.39447 0.4359 0.47294
DataEnd
    
```

## 2.4 – Cálculo da BRDF e Simulação no Zemax

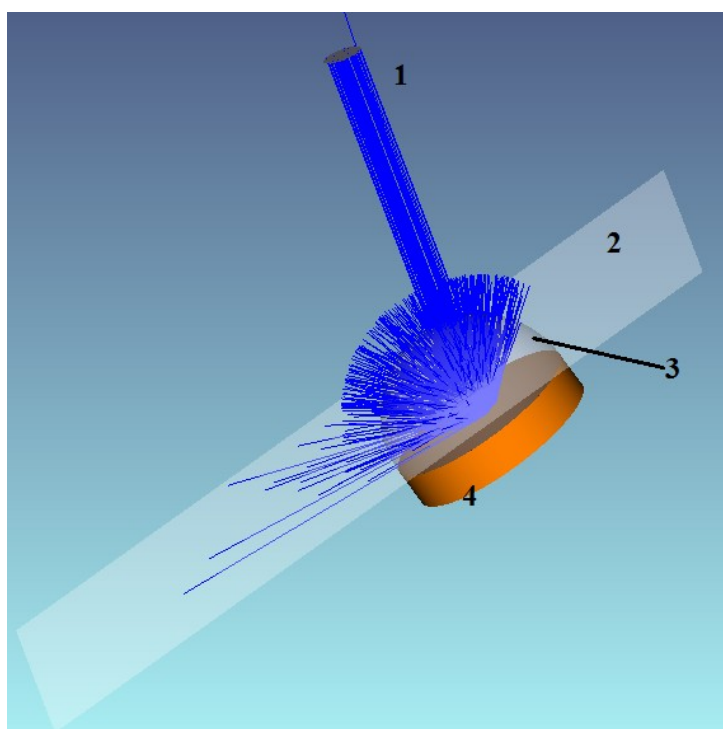
Os dados obtidos do sistema de aquisição foram utilizados no MatLab, para calcular a BRDF. Com o algoritmo usado para este cálculo foram gerados gráficos do comportamento da refletância na superfície de cada material e também o resultado da TIS deles. Na figura 2.5 são ilustrados dois gráficos que foram gerados dos dados referentes a amostra padrão.

**Figura 2.5:** Gráfico gerado no MatLab referente a amostra padrão.



Para a simulação no ZEMAX, foi tomada somente a região positiva do eixo zênite do sensor, e seus respectivos dados do ângulo da mesa e da medida obtida pelo sensor. Nas simulações pode-se obter a TIS da amostra. Para ilustrar uma simulação no programa, tomou-se os dados da amostra padrão, obtidos no sistema de aquisição, com um comprimento de onda de 601 nm. O ângulo entre a amostra e a luz incidida é de 15°. Na Figura 2.6 vê-se o comportamento da amostra com a luz incidida sobre ela.

**Figura 2.6:** Modelo da simulação no ZEMAX.

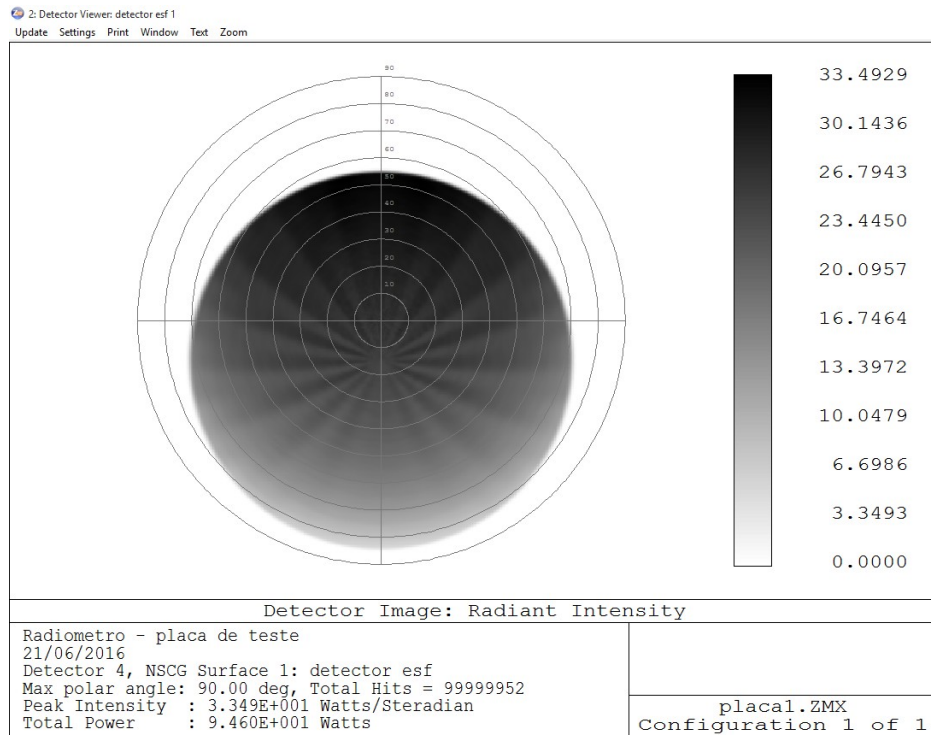


Onde:

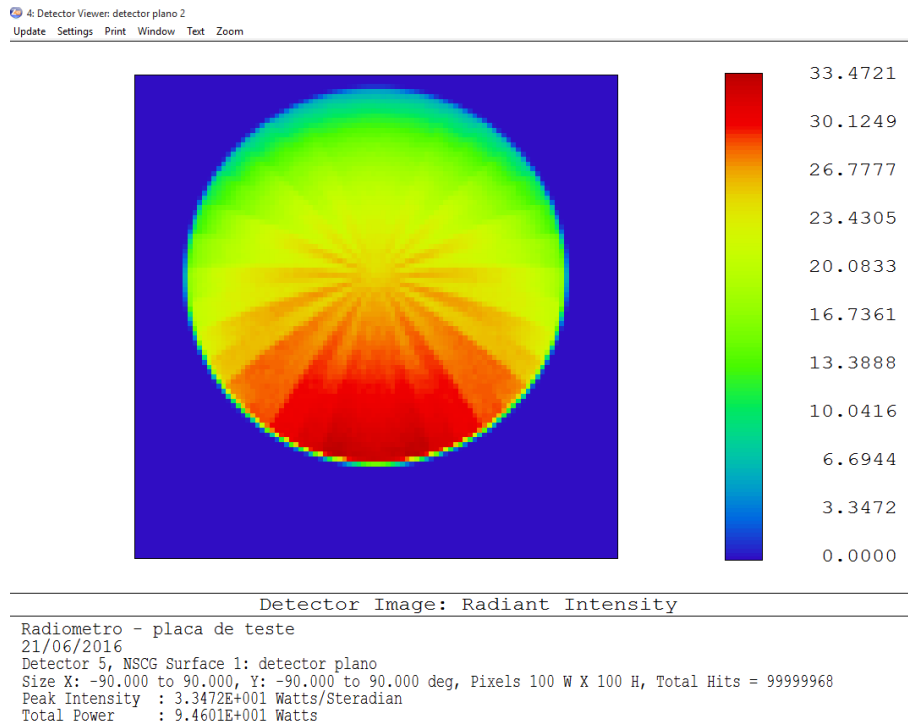
1. Luz de incidência sobre a amostra;
2. Detector plano da refletância da luz incidida;
3. Detector hemisférico da refletância;
4. Amostra em forma cilíndrica modelada no programa. A face da amostra se comportará de acordo com os dados do padrão citado.

Na imagem acima observa-se o comportamento da luz, representada pelas linhas azuis, ao entrar em contato com a amostra. Além do feixe incidido sobre ela, o ZEMAX também mostra a luz que é refletida. A intensidade dela é medida pelos detectores, que neste caso são o hemisférico e o plano, mostrados nas figuras 2.7:

**Figura 2.7: (a) Leitura no detector hemisférico.**



**(b) Leitura no detector plano.**





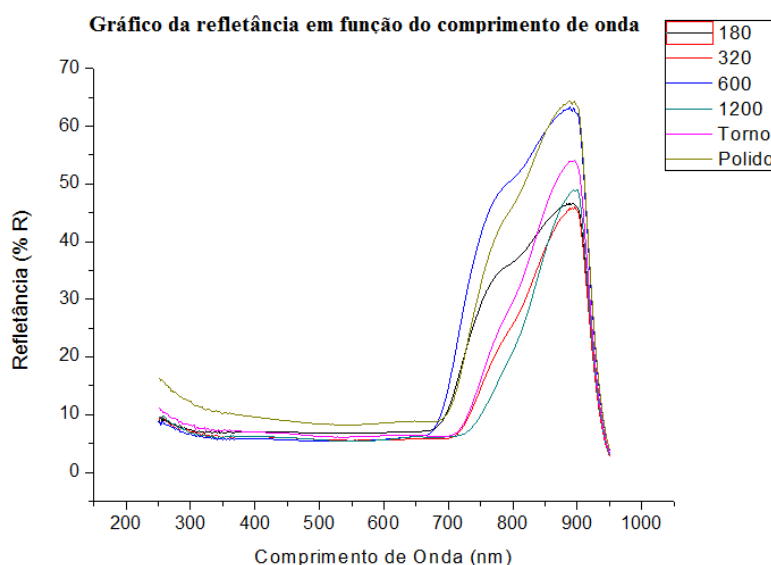
As figuras acima mostram a intensidade da luz refletida. Nelas nota-se uma intensidade maior do lado oposto a fonte de luz, sendo a região mais escura no detector hemisférico e a região vermelha no detector plano. Também é possível obter a intensidade total de luz refletida (TIS), sendo ela o “Total Power” e o pico de maior intensidade (“Peak Intensity”) lido no detector.

### 3 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

#### 3.1 – Resultado das medidas realizadas no espectrofotômetro

As amostras de 24mm foram medidas, e dispostas no gráfico abaixo:

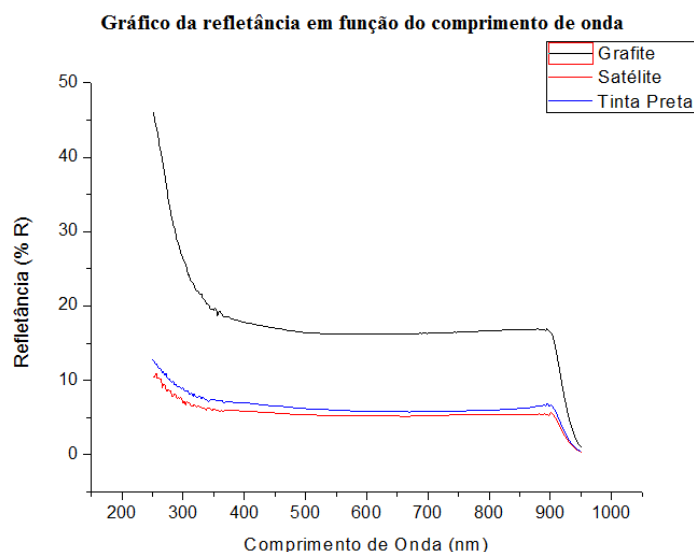
**Figura 3.1:** Gráfico da refletância das amostras anodizadas.



Podemos observar no gráfico que as amostras com maior refletância, na região próxima a 900 nm, são as de acabamento com lixa de 600 e a amostra polida. Era esperado que a amostra polida possuísse uma refletância elevada, pois o acabamento feito no material o fez ter a característica espelhada. As amostras com acabamento de 180, 320 e 1200 possuem um pico de refletância bem próximo, em torno de 45%, mesmo com a amostra de 1200 possuindo um acabamento mais fino que a de 180 e a de 320. Também podemos observar que o alumínio anodizado não é uma boa escolha para a absorção da

luz na região do infravermelho. Após realizar essas medidas, optou-se pelo uso das amostras de 1200 e torneadas para as simulações no MatLab e no ZEMAX. Também foram obtidas as refletâncias das amostras com tintas e grafite, mostrando seu comportamento no gráfico da figura 3.2.

**Figura 3.2:** Refletância do grafite, da tinta e da tinta para satélite.



Podemos observar que os materiais possuem uma refletância constante na região do visível. Há uma queda na região do infravermelho próximo ao comprimento de onda de 900 nm e uma elevação na região do ultravioleta quando próximo aos 350 nm. No grafite, essa elevação é mais acentuada que nas amostras com tinta, comum e de satélite.

### 3.2 – Resultados obtidos no MatLab

A BRDF e a TIS foram calculadas no algoritmo feito no MatLab. As amostras utilizadas foram as de alumínio anodizado com acabamento de 1200 e torneada, e as amostras de grafite, de tinta para satélite e tinta preta comum. Nas tabelas 3.1 e 3.2 observa-se os resultados dos cálculos da TIS para as amostras citadas, sendo com ângulos de incidência de 15° e 30° respectivamente.

**Tabela 3.1:** Resultado da TIS obtida no MatLab com incidência de luz à 15°.

<b>Amostras</b>	<b>TIS obtida</b>
1200	0.0335
Torneada	0.2689
Grafite	0.0819
Tinta preta	0.0268
Tinta para satélite	0.0336

**Tabela 3.2:** Resultado da TIS obtida no MatLab com incidência de luz à 30°.

<b>Amostras</b>	<b>TIS obtida</b>
1200	0.0439
Torneada	0.0357
Grafite	0.1117
Tinta preta	0.0448
Tinta para satélite	0.1118

As medidas no sistema de aquisição foram realizadas para uma *Escala* (Equação (2)) de 1V, com exceção da torneada com ângulo à 30°, que foi usada uma de 100mV. A *Escala* escolhida deve ser maior que a maior voltagem lida no Merlin (item 9 da Figura 2.1) e, quanto mais próxima desse valor lido, melhores serão os dados obtidos. Poderá ser feito ajustes na *Escala* utilizada para estes e para os futuros dados se for encontrada uma que descreva melhor o sinal. Posteriormente, os dados serão preparados como os mostrados na Figura 2.4, para que possam ser simuladas no ZEMAX, fazendo assim a comparação dos resultados obtidos nele com os do MatLab.

#### 4 – CONCLUSÃO

Pôde-se obter a TIS das amostras escolhidas, sendo os dados obtidos para um comprimento de onda de 650,5 nm e com ângulo de incidência de 15° e 30°. Posteriormente serão feitas medições dessas amostras para outros comprimentos de onda e outros ângulos de incidência, calculando a TIS no MatLab e comparando os resultados obtidos com os dados simulados no ZEMAX.

#### 5 – REFERÊNCIAS

- [1] Luiz A. Berni, Mario S. Ribeiro. Desenvolvimento de um Sistema para medidas de Refletância. **Seminário de Iniciação Científica e Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (SICINPE)**, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2013.
- [2] Luiz A. Berni, Luiz G. O. Santos. Medidas de BRDF em Amostras de Alumínio Anodizado Preto. **Seminário de Iniciação Científica e Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (SICINPE)**, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2015.
- [3] Zemax LLC. Zemax: Optical Design Program. 2011. p.37. Disponível em: <https://physics.ucsd.edu/neurophysics/Manuals/Zemax/ZemaxManual.pdf>. Acessado em: 18/06/16.
- [4] Acessado em: <http://lidaris.com/glossary-2/total-integrated-scattering-tis/>. Data: 18/06/16.
- [5] Luiz G. O. Santos, Luiz A. Berni. Medidas de BRDF em Amostras de Alumínio Anodizado Preto. Relatório parcial de Iniciação Científica, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos, 2016.

## **6 – TRABALHOS SUBMETIDOS**

L.A. Berni; L.G.O.Santos; *BRDF and TIS measurements from black opaque surfaces*;  
IX Conference RIAO-OPTILAS; Pucón, Chile. Novembro de 2016.