

Comportamento Espectral de Material Absorvedor de Radiação Eletromagnética entre 350 e 1500 nm

Nélson Alex Roso¹, Mirabel Cerqueira Rezende^{1,2}, Elizabete Caria Moraes³

¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias. CEP 12.228-900 - São José dos Campos - SP, Brasil

²Instituto de Ciência e Tecnologia/UNIFESP, Rua Talim, 330. CEP 12.231-280 - São José dos Campos - SP, Brasil

³Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Av. dos Astronautas, nº 1758, Jd. Granja. CEP 12.227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil

Resumo — O comportamento espectral de alvos, definido como o estudo do espectro da radiação espectral de objetos naturais e artificiais, recai principalmente sobre o fator de refletância inerente a esses alvos. Vários métodos procuram analisar os gráficos de refletância espectral, comparando-os com os gráficos característicos de alvos naturais já conhecidos. Limitando-se ao espectro entre 350 e 1500nm, este artigo faz uma análise comparativa entre as assinaturas espectrais de alvos conhecidos com o espectro de refletância de um dado Material Absorvedor de Radiação Eletromagnética (MARE), o qual é amplamente utilizado como absorvedor no espectro de micro-ondas. Como resultado, a análise mostra que o MARE analisado possui um bom desempenho no espectro estudado, podendo ser utilizado como camuflagem para mascarar alvos estratégicos e dificultar a detecção de equipamentos militares nas regiões espectrais do visível e do infravermelho próximo.

Palavras-Chave — MARE, fator de refletância, comportamento espectral.

I. INTRODUÇÃO

Como primeiro produto a ser utilizado em sensoriamento remoto, as fotografias obtidas pioneiramente por Daguerre e Niepce, em 1839, imediatamente tiveram seu uso recomendado para levantamentos topográficos. O desenvolvimento nessa direção foi tão rápido, que já em 1858 o Corpo de Engenharia da França estava utilizando fotografias tomadas a partir de balões para o mapeamento topográfico de amplas áreas do território francês [1].

Com o início da utilização do avião, as primeiras fotografias aéreas foram tomadas em 1909, pelos irmãos Wright, sobre o território italiano. Paralelo a esse fato, o desenvolvimento das câmaras fotográficas, filmes, etc, trouxe um significativo impulso às aplicações das fotografias para o levantamento de recursos naturais, visto que permitiu a obtenção de dados sob condições controladas e com a cobertura de áreas relativamente amplas [1].

Em 1930, as fotografias aéreas coloridas tornaram-se disponíveis e, nesta mesma época, já se haviam iniciado estudos para a produção de filmes sensíveis à radiação infravermelha. Com o início da II Grande Guerra Mundial começaram estudos envolvendo o processo de interação da radiação com alvos nessa faixa do espectro, cuja finalidade era produzir filmes infravermelhos para a detecção de camuflagem [1].

Em contrapartida a essa linha de pesquisa, a Inglaterra iniciou a busca por materiais que pudessem esconder ou camuflar seus alvos em Território Nacional, pesquisando no sentido contrário à detecção. Com essa premissa, o primeiro produto de sucesso foi uma borracha natural aditada com carbono, conhecido como DX1, utilizada no radar do bombardeiro Vulcan, obtida em 1947 por meio de pesquisas

no Laboratório de Plessey. Esse grupo de pesquisas também desenvolveu materiais absorvedores para navios, com a principal finalidade de reduzir falsos ecos na detecção radar. Os materiais desenvolvidos eram absorvedores magnéticos ressonantes, formados de borracha natural e elastômeros de neoprene que operavam entre 1 e 18 GHz. Quando colados a uma estrutura metálica reduziam as reflexões de 20 a 30 dB. Em função do sucesso desta linha de absorvedores, atualmente estes materiais são usados em quase todos os navios britânicos.

No final da década de 70, quando o governo norte-americano iniciou trabalhos para a produção de um bombardeiro de baixa detecção por radar, surgiu o maior interesse na redução da *Radar Cross Section* (RCS), assim como o interesse na fabricação de Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (MARE), com o objetivo de reduzir a RCS de aeronaves, navios e carros de combate.

Hoje, os trabalhos mais inovadores na área de processamento de MARE estão utilizando, como centros absorvedores da radiação eletromagnética (REM), polímeros condutores para a obtenção de borrachas e tintas, cujas principais características envolvem valores de atenuação comparáveis aos obtidos com ferritas, baixos valores de densidade e versatilidade no processamento. A utilização de polímeros condutores tem permitido a obtenção de MARE mais leves com característica ressonantes ou que atuam em banda larga [2].

Sendo assim, motivado pelo fato do MARE ser de elevado interesse militar, com finalidades estratégicas, operacionais e táticas, de maneira pioneira este trabalho tem por objetivo analisar o comportamento espectral de uma amostra de MARE, na faixa de frequências entre 350 e 1500nm, comparando o Fator de Refletância (FR) do referido material com outros materiais convencionais.

II. TECNOLOGIA MARE

Os MARE utilizam as propriedades de troca da energia da REM por energia térmica. Os materiais utilizados nesta tecnologia podem ser dos tipos carbonosos, óxidos cerâmicos (ferritas) e polímeros condutores. Estes materiais quando atingidos por uma onda eletromagnética têm a estrutura molecular excitada e parte da energia incidente é convertida em calor, conforme ilustra a Fig. 1.

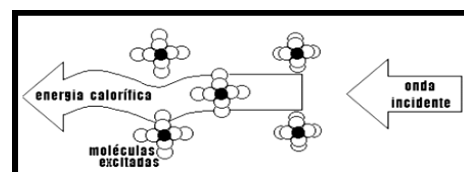


Fig. 1. Transformação da REM em calor pelos MARE [2].

O formato da estrutura de uma aeronave e os materiais empregados na sua construção e no seu revestimento, destacando-se aqui o uso de compósitos com fibras de carbono e revestimentos à base de ferritas, negro de fumo e polímeros condutores, são parâmetros envolvidos na tecnologia de baixa detecção por ondas eletromagnéticas. Alguns materiais podem ser usados para absorver uma parte da radiação incidente em uma determinada faixa de frequências ou para atenuar uma elevada porcentagem do sinal do radar em banda larga de frequências. Em sendo assim, a geometria do alvo e as propriedades dielétricas e magnéticas dos materiais, ditam a transparência e a refletividade de uma estrutura perante a iluminação radar.

A classificação de MARE pode dividir esses materiais como aqueles que interagem com o campo magnético ou elétrico da onda ou a combinação de ambos, denominados absorvedores híbridos. A eficiência na absorção do sinal emitido por uma determinada fonte é avaliada por medidas de refletividade do material ou do objeto em questão. Os absorvedores dielétricos são obtidos a partir da adição de pequenas partículas de carbono, grafite ou partículas de metal pulverizado em uma matriz polimérica e os absorvedores magnéticos pela incorporação de partículas magnéticas, como ferritas, à matriz polimérica do material [2].

Até então, os MARE encontram aplicações nas faixas espectrais de 0,003 a 10 m de comprimento de onda (λ), podendo-se citar: antenas de alto desempenho, revestimentos de câmaras anecóicas, proteção eletromagnética de materiais aeroembarcados, blindagem de radiação danosa em aparelhos celulares, sistemas de segurança interna de aeronaves; cabeamento para controle de geração de ruídos espúrios; controle de interferência de sinais de TV em edifícios; segurança de fornos de micro-ondas; produção de válvulas cardíacas com proteção eletromagnética; na indústria militar na redução da RCS de navios, aeronaves e carros de combate; na redução de ondas superficiais na blindagem de compartimentos; em atenuadores e terminações para guias de ondas e conexões; na otimização de diagramas de irradiação de antenas; na redução de reflexões indesejáveis de objetos e dispositivos, entre outras [2].

Na faixa espectral do visível (VIS) e do infravermelho próximo (NIR), as aplicações dos MARE encontram também a redução da assinatura espectral como principal objetivo. Até o momento, estudos envolvendo a redução da refletância (ρ) nas regiões VIS e NIR de alvos naturais e artificiais, por meio da utilização de MARE, não são disponíveis. No entanto, o estudo da camuflagem de alvos na faixa espectral de 350 a 1500 nm é de bastante interesse, pois essa faixa é intensamente utilizada por sensores infravermelhos e visíveis, tais como os *Forward Looking Infrared Systems* (FLIR) e os mísseis guiados a laser (como exemplo, o míssil *Sidewinder AIM-9L*).

III. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESPECTRAL

A caracterização de como e de quanto um objeto reflete a REM pode ser feita em diversos níveis e formas. Nos primeiros estão incluídos os chamados níveis de aquisição de dados, os quais podem se dar aos níveis laboratorial, de campo, aéreo e orbital. Em cada um desses níveis podem ser adotadas variadas formas, as quais incluem as chamadas geometrias de iluminação e de observação. A primeira refere-se ao posicionamento espacial da fonte de REM em relação

ao objeto, enquanto que a segunda refere-se ao posicionamento espacial do sensor. Os níveis e as formas condicionam as caracterizações tornando seus resultados específicos para as situações nas quais foram concebidos. Este fato torna imprescindível que em qualquer caracterização da ρ de um objeto, sejam bem descritas as condições de iluminação e de observação adotadas, tanto no que se refere aos domínios espacial, espectral, temporal e ainda das suas geometrias [1].

Como referência de comparação, os aspectos que são apresentados a seguir, Fig. 2, referem-se às características básicas de materiais em refletir a REM sobre eles incidente. Observa-se que na região do VIS, os alvos possuem maior semelhança espectral, enquanto que na região do NIR eles podem ser mais facilmente individualizados. Nos pontos de intersecção entre as curvas, os quais ocorrem com alguma frequência em pontos específicos do espectro, diz-se que os alvos apresentam a mesma ρ , ou seja, eles assumem uma mesma “aparência”, quando observados mediante alguma técnica de Sensoriamento Remoto (SR) [1].

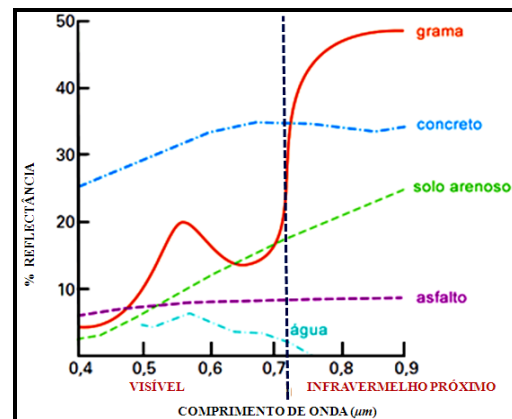


Fig. 2. Refletância de materiais de conhecimento comum [1].

Por meio da técnica de análise descrita é possível prever a aparência de alvos em produtos de SR, tais como imagens orbitais e/ou fotografias aéreas. Esta aparência é expressa pela tonalidade (clara ou escura) assumida pelos alvos e dependendo do tipo de produto, ela ainda pode ser expressa pela cor e pela textura. Logo, o conhecimento sobre o comportamento espectral de alvos é fundamental para a extração de informações a partir de produtos de SR, quer sejam fotografias ou imagens [1].

IV. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, o Comportamento Espectral de Alvos (CEA) foi atribuído ao estudo do FR dos materiais selecionados, que serviram para analisar a assinatura espectral dos mesmos, ou seja, analisar seus espectros de refletância espectral (ρ_r). Nesse sentido, foi estudado como os objetos comportavam-se no espectro analisado, contemplando somente as propriedades de reflexão, uma vez que, as maiorias dos atuais sensores disponíveis para o estudo dos recursos naturais utilizam-se da REM refletida. Contudo, deve-se alertar que o CEA só é plenamente compreendido quando são estudadas as propriedades de reflexão, transmissão e absorção da REM.

A atividade experimental envolvida neste trabalho foi realizada no Laboratório de Radiometria (LARAD) do

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em condições de iluminação e atmosfera controladas.

Durante o procedimento experimental, utilizaram-se os fundamentos de SR aplicados ao comportamento espectral de vegetação, solos, rochas e água. A aquisição dos dados foi realizada em conformidade com as técnicas laboratoriais utilizadas no LARAD do INPE, as quais resultaram na coleta das radiancias espectrais (L_λ) dos alvos supramencionados. O FR foi calculado para todos os alvos e utilizado para comparar as características biofísicas destes.

Para as medidas radiométricas, foi utilizado o espectralradiômetro portátil *FieldSpec Pro FR (FSP 350-2500)* com campo de visada (FOV) de 25°, por meio do qual foram obtidos os espectros de radiancia (L_λ) dos alvos estudados. Para se obter o FR dos alvos, utilizou-se uma placa lambertiana *Spectralon-99* (98% de refletância), como referência da L_λ . Uma lâmpada halógena de 250 W iluminava o ambiente dos ensaios, a qual simulava a irradiância solar em condições laboratoriais.

Caracterizaram-se os seguintes alvos: amostra de MARE comercial do tipo espuma de poliuretano plana impregnada com negro de fumo, da empresa *Cumming* (Fig. 3-1), uma folha verde recém-colhida de um arbusto de jardim, tecido feltro preto, tecido de algodão convencional preto e uma superfície metálica pintada de preto. Para estes alvos, foram obtidas as radiancias espectrais e calculados os FR.

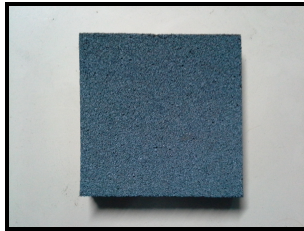


Fig. 3. Amostra de MARE utilizada na análise (cedida pelo LABGE/ ITA).

Os experimentos tiveram o sistema de medidas mantido sob as mesmas condições de iluminação e de posicionamento dos dispositivos, de modo que a avaliação do FR das cinco amostras estudadas e da referência fosse repetitiva e confiável. A lâmpada halógena foi posicionada a 1,0 m da amostra sob teste (distância diagonal) e o espectralradiômetro *FieldSpec* foi colocado verticalmente a 2,0 cm das amostras, como pode ser observado na Fig. 4.

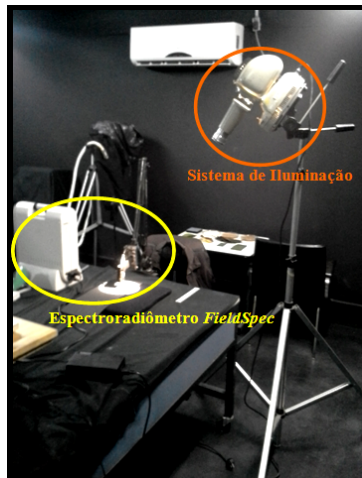


Fig. 4. Configuração radiométrica utilizada no LARAD/INPE.

V. DISCUSSÃO E RESULTADOS

Uma vez já exploradas as assinaturas espectrais de alvos regularmente encontrados na natureza, conforme descrito no capítulo III, neste tópico aborda-se alvos de interesse específico, ou seja, alvos cujo conhecimento das assinaturas espectrais é de grande importância para aplicações militares e civis. Nesse contexto, sendo o principal objetivo deste trabalho, apresenta-se a análise da amostra de MARE (Fig.3), como meio de camuflagem dos outros quatro materiais estudados.

De acordo com a literatura [1], o FR de um alvo é a razão entre a radiancia de este alvo ($L_{a,\lambda}$) pela radiancia de uma superfície lambertiana ideal ($L_{l,\lambda}$), nas mesmas condições de iluminação (θ_i, θ_o), observação (Φ_i, Φ_o) e comprimento de onda (λ), utilizadas na realização dos experimentos, e calculado conforme (1):

$$FR_\lambda(\theta_i, \Phi_i; \theta_o, \Phi_o; \lambda) = L_{a,\lambda}(\theta_i, \Phi_i; \theta_o, \Phi_o; \lambda) / L_{l,\lambda}(\theta_i, \Phi_i; \theta_o, \Phi_o; \lambda) \quad (1)$$

Utilizando a relação acima, foram geradas as curvas de FR para as amostras de MARE, folha verde sadia (recém-colhida), feltro preto, tecido de algodão preto e uma placa de metal pintada de preto (Fig.5).

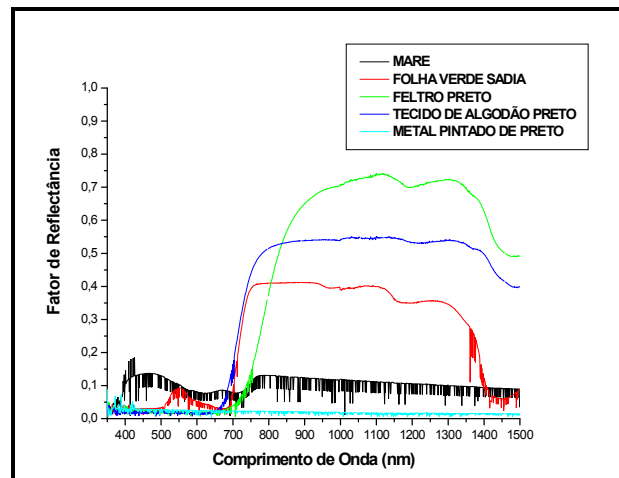


Fig. 5. Fator de Refletância dos alvos do experimento.

Observa-se que na região do VIS (400 a 700 nm), o MARE possui FR maior que a dos outros alvos, não sendo aplicável para camuflagem. No entanto, no NIR (700 a 1500 nm) existe essa aplicabilidade, uma vez que o mesmo possui FR menor que a maioria das amostras avaliadas, exceto ao FR do metal pintado de preto, o qual se mantém contínuo no espectro analisado. Uma comparação simples é possível de ser feita observando a assinatura espectral do MARE em 1000 nm: enquanto a folha verde sadia possui FR de $\approx 0,4$, o tecido de algodão preto FR de $\approx 0,55$ e o feltro preto FR de $\approx 0,7$, a amostra de MARE mantém seu FR em $\approx 0,1$, ou seja, o desempenho desta amostra, se utilizada para camuflagem do feltro preto, por exemplo, pode diminuir em até 7 vezes o FR do alvo.

A camuflagem pelo MARE estudado no NIR permite que os alvos com maior FR permaneçam indistintos no ambiente em que os cercam, ou seja, alvos que seriam detectados na faixa espectral do NIR irão se confundir com o espectro do MARE, uma vez que este funcionará como um bloqueador da L_λ do alvo naquela faixa espectral.

Como mencionado anteriormente, existem várias composições químicas que podem atuar como MARE. No entanto, ressalta-se que esta análise foi realizada com uma amostra de MARE à base de negro de fumo, impregnado em uma espuma de poliuretano, o qual foi desenvolvido para atenuar frequências na faixa de micro-ondas, com potencial de mascarar assinaturas espectrais de alvos navais, aéreos e terrestres, perante a iluminação radar. Assim, a avaliação de seu comportamento espectral na região do NIR (não encontrada na literatura consultada) pode trazer benefícios quando incorporado a materiais mais refletivos. Por isso, as características observadas neste estudo, contribuem como conhecimento da atenuação da REM na faixa de micro-ondas e do NIR.

As diferenças encontradas nos cálculos do FR dos materiais estudados, nos comprimentos de onda do VIS e do NIR, podem vir a influenciar a fabricação de artefatos bélicos, pois, quanto menor o FR maior é a REM absorvida pelo material, o que é desejável em certas circunstâncias de camuflagem e em certas localidades com climas específicos.

Uma análise mais específica pode ser feita separando os espectros VIS e NIR, e, para isso, as Fig. 6 e 7 mostram em melhor definição o que foi exposto até aqui.

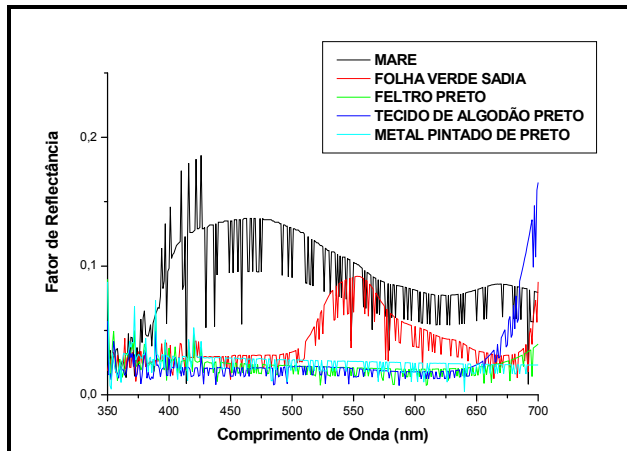


Fig. 6. Fator de Refletância na faixa do VIS dos alvos do experimento.

Limitada ao espectro do VIS, na Fig. 6 observa-se que o MARE não servirá de camuflagem para os materiais analisados. Apesar disso, existe aplicação para esse material, caso seja desejável esconder aspectos do espectro dos outros materiais, pois o MARE irá saturar a faixa espectral considerada, impedindo que sensores no visível obtenham a assinatura espectral de objetos encobertos pelo MARE. Nessa medição observa-se a presença de ruído na curva de FR, possivelmente pela variação da corrente elétrica que alimentava o espectroradiômetro e pela oscilação na radiação produzida pela lâmpada halógena de 250 W do LARAD.

Na Fig. 7, limitado ao espectro do NIR, observa-se que o MARE é um excelente material de camuflagem para os materiais analisados, exceto para o metal pintado de preto, que possui um FR menor neste espectro. No entanto, a utilização de MARE neste caso poderá confundir sensores que buscam esse tipo de material (alvo) (metal pintado de preto). A aplicação da amostra de MARE nesta faixa do espectro é bastante ampla, indo desde a simples camuflagem até a absorção de lasers designadores e iluminadores, utilizados em guiamento de bombas e mísseis durante conflitos armados, atenuando ou impedindo que sensores no

NIR obtenham a assinatura espectral dos objetos encobertos por MARE.

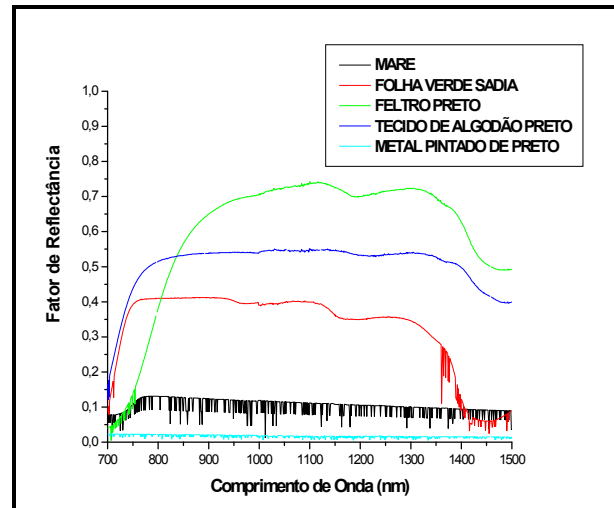


Fig. 7. Fator de Refletância na faixa do NIR dos alvos do experimento.

VI. CONCLUSÕES

Nos experimentos realizados foram comparadas curvas de FR dos alvos selecionados, possibilitando observar que a assinatura espectral no NIR de alvos como folhas verdes de vegetação, feltro preto e tecido de algodão preto podem ser camuflados com MARE, propiciando vantagens estratégicas, operacionais e táticas em ambiente hostil. No espectro do VIS, o MARE avaliado serve para confundir sensores que buscam materiais específicos nessa faixa de frequências, ou seja, pode ser alterado as assinaturas espectrais de objetos antes conhecidos e armazenados nas bibliotecas espectrais.

Quanto ao metal pintado de preto, com uma assinatura espectral muito reduzida em relação a todos os outros alvos estudados, foi possível inferir que objetos com essas características não serão discriminados nas regiões do VIS e NIR, mediante a cobertura MARE, uma vez que o sinal refletido será fortemente confundido com a de outros alvos.

Propositadamente escolhida, a seleção do espectro entre 350 e 1500 nm serve para muitas aplicações militares, não significando restrição do modelo, mas sim uma delimitação da pesquisa.

Por fim, foi comprovada pela primeira vez a utilização do MARE no espectro de frequências diferente de micro-ondas, ressaltando-se a simplicidade do experimento, o qual pode possibilitar o estudo do comportamento espectral de alvos em outras regiões do espectro eletromagnético.

REFERÊNCIAS

- [1] INPE. Introdução ao Sensoriamento Remoto. Material didático fornecido pelo INPE. Disponível em: <<http://www.agro.unitau.br/>>. Acessado em: 01/SET/2013.
- [2] REZENDE, Mirabel Cerqueira; DA SILVA, Fábio Santos; MARTIN, Inácio Malmonge. Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética. Disponível em: <http://www.nelsonlage.pro.br/fisica/RadiacaoEletromagnetica.pdf>. Acessado em: 01/SET/2013.