



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

PATRICIO ENRIQUE BEJAR REJAS

**FILMES FINOS METÁLICOS ABSORVEDORES DE RADIAÇÃO
ELETROMAGNÉTICA APLICADOS À TECNOLOGIA FURTIVA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
ENGENHARIA AEROESPACIAL

2014

Patricio Enrique Bejar Rejas

FILMES FINOS METÁLICOS ABSORVEDORES DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA
APLICADOS À TECNOLOGIA FURTIVA

Trabalho de conclusão de curso submetido ao Programa de Graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Aeroespacial.

Orientadora: Prof^ª. Viviane Lilian Soethe, Dra.

Joinville
2014



Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Rejas, Patricio Enrique Bejar
Filmes finos metálicos absorvedores de radiação
eletromagnética aplicados a tecnologia furtiva / Patricio
Enrique Bejar Rejas ; orientadora, Viviane Lilian Soethe -
Florianópolis, SC, 2014.
53 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville.
Graduação em Engenharia Aeroespacial.

Inclui referências

1. Engenharia Aeroespacial. 2. Materiais absorvedores
de radiação eletromagnética. 3. Tecnologia furtiva. 4.
Filmes finos metálicos. I. Soethe, Viviane Lilian. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Aeroespacial. III. Título.

Patricio Enrique Bejar Rejas

**FILMES FINOS METÁLICOS ABSORVEDORES DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA
APLICADOS À TECNOLOGIA FURTIVA**

Este trabalho de conclusão de curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Aeroespacial, e aprovado em sua forma final pelo Programa de Graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville, 14 de Julho de 2014.

Prof. Juan Pablo de Lima Costa Salazar, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof.^a Viviane Lilian Soethe, Dr.^a
Orientadora
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.^a Mirabel Cerqueira Rezende, Dr.^a
Universidade Federal de São Paulo

Prof. Rafael Gallina Delatorre, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina



Este trabalho é dedicado aos meus pais e à minha linda esposa.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pois pela sua maravilhosa graça permitiu que eu pudesse viver o meu sonho, dando-me inspiração a continuar nos momentos mais difíceis.

À minha família, especialmente aos meus pais, que sempre sonharam junto comigo, sacrificando o que fosse necessário para que eu pudesse chegar até esse momento. Vocês são meu referencial!

À minha esposa. Você fez com que tudo tivesse ainda mais sentido. O seu amor e paciência me constrangem. Ser um com você é mais do que um privilégio, é a demonstração do amor de Deus por mim. Amo-te eternamente.

À minha orientadora e amiga Viviane. Sua dedicação sempre foi superior ao que a sua função exige. Espero um dia poder retribuir tudo o que você fez por mim, e principalmente poder fazer o mesmo com outro aluno que sonhe alto e tenha o seu sonho concretizado, assim como aconteceu comigo.

Aos meus amigos, agora engenheiros. Passamos por diversas adversidades ao longo dessa fase. O suporte de vocês foi imprescindível para que pudesse chegar até este momento.

Aos amigos mais chegados que irmãos. Vocês sempre me fizeram perceber que Deus é bom pelo simples fato de poder compartilhar minha vida com vocês. Vocês são muitos, mas podem simplesmente ser identificados como Onda Dura. TMJ pela eternidade!

Aos pesquisadores, técnicos e colaboradores da AMR/IAE, em especial à professora Mirabel, por terem aberto as portas dos laboratórios e da instituição para que este trabalho fosse realizado.

Ao professor Evandro Luís Nohara da UNITAU, por ter disponibilizado, sem nenhuma restrição, o Laboratório de Plasma da instituição.

Finalmente, à UFSC. Ser integrante da primeira turma de formandos do Campus de Joinville não foi uma tarefa fácil. Sou muito grato pelo esforço dedicado ao longo desses cinco anos, por parte dos diretores, professores e servidores.

“Vocês, por acaso, já viram algo que se compare à graça generosa de Deus ou à sua profunda sabedoria? É algo acima da nossa compreensão, que jamais entenderemos. Há alguém que possa explicar Deus? Alguém inteligente o bastante para lhe dizer o que fazer? Alguém que tenha feito a Ele um grande favor ou a quem Deus tenha pedido conselho? Tudo dEle procede; Tudo acontece por intermédio dEle; Tudo termina nEle.”

(Romanos 11:33-36 , A Mensagem)

RESUMO

Os materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE) promovem a atenuação da energia eletromagnética incidente por meio da transformação desta energia sob a forma de calor, através de processos intrínsecos de perda. Os MARE são amplamente utilizados na solução de problemas relacionados com processos de interferência e compatibilidade eletromagnética. Sua aplicação abrange diversos setores, como o aeroespacial, defesa, médico e automotivo, por exemplo. No setor aeroespacial, os MARE são aplicados no desenvolvimento de tecnologia furtiva, a qual torna uma aeronave imperceptível aos radares de detecção em faixas de frequências específicas. No desenvolvimento de aeronaves, um requisito importante é a utilização de materiais leves e de fácil conformabilidade, devido, principalmente, às limitações de peso e à necessidade de manobrabilidade. Dentro desse panorama, os filmes finos metálicos surgem como uma solução tecnológica para essa situação, pois possuem baixa densidade e espessuras na ordem de dezenas de nanômetros. Devido ao fato desta tecnologia possuir um cunho estratégico e de soberania nacional, o acesso aos MARE é limitado, tendo um rígido controle de sua comercialização, sendo esse mais um fator importante para o estudo de MARE no Brasil. O estudo da eficiência de filmes finos metálicos como MARE aos níveis nacional e internacional é recente. O presente trabalho está inserido em um projeto de pesquisa conjunto entre a UFSC e o Instituto de Aeronáutica e Espaço. Neste projeto, filmes finos metálicos de diferentes materiais foram obtidos e estudados quanto à sua capacidade de atenuarem a radiação eletromagnética na faixa de frequências de micro-ondas (8-12 GHz). Verificou-se, porém, que algumas alterações na continuidade dos recobrimentos atuavam de forma significativa na resposta do material quanto à atenuação. Neste sentido, no presente trabalho de conclusão de curso realizou-se um estudo da capacidade de atenuação de radiação eletromagnética de filmes finos metálicos de alumínio, depositados sobre substratos do tipo malha com diferentes espaçamentos entre dois nós consecutivos, obtidos pela técnica de Magnetron Sputtering. Investigou-se a influência da configuração do substrato no processo e na amplitude da atenuação apresentada pelo conjunto filme/substrato e compararam-se estes resultados com os obtidos para os filmes finos contínuos. Os resultados demonstraram que a espessura do recobrimento e a configuração do substrato alteram de forma significativa a amplitude e a frequência na qual a atenuação é mais pronunciada. Amplitudes de atenuação de até 90% foram obtidas para filmes finos com espessuras da ordem de 50 nm depositados em substratos com espaçamentos de 1,68 mm entre nós consecutivos. Estes resultados demonstram que a alteração na continuidade do substrato apresenta grande importância para a ampliação da eficiência dos MARE constituídos de filmes finos metálicos.

Palavras-chave: MARE. Filmes finos metálicos. Magnetron sputtering. Tecnologia furtiva.

ABSTRACT

The radar absorber materials (RAM) promote the attenuation of the electromagnetic energy incident by the transformation on to heat through intrinsic loss processes. The RAM are widely used as solution of problems related to the processes of electromagnetic interference and compatibility. Its application covers several sectors, such as the aerospace, defense, medical and automotive. In the aerospace sector the RAM are used in the development of stealth technology, which makes an aircraft imperceptible to detection radars in specific frequency bands. In the aircraft development, an important requirement is to use light materials and with easy formability, due mainly to the limitations of weight and the need of maneuverability. In this panorama, the metallic thin films arise as a technological solution for this situation, because they have low density and thickness in the order of tens of nanometers. Due to the fact that this technology has a strategic nature and national dominion, the access to the RAM is limited, having a hard control of its commercialization, being another important fact for the RAM studies in Brazil. The study of efficiency of metallic thin films as RAM in a national level is recent. The present work is inserted in research project collaboration between UFSC and the Space and Aeronautics Institute. In this project, metallic thin films of different materials were obtained and studied for their ability in attenuating the electromagnetic radiation in frequency bands of microwaves (8-12 GHz). It has been found, however, that some changes in the continuity of coatings were acting in a significant way in the material response when related to the attenuation. In this way, in the present course conclusion work it was studied the attenuation capacity of electromagnetic radiation of aluminum metallic thin films, deposited by Magnetron Sputtering technique over substrates of mesh type with different spacing between consecutive nodes. It was investigated the substrate configuration influence in the process and in the amplitude attenuation presented by the set film/substrate and these results were compared to the ones obtained for the continuous thin films. The results show that the thickness of covering and the substrate configuration change in a significant way the amplitude and frequency in which the attenuation is more pronounced. Amplitudes of attenuation until 90% were obtained for thin films with thicknesses in order of 50 nm deposited in substrates with spacing of 1,68 mm between consecutive nodes. These results demonstrate that the change in the substrate continuity presents great importance to the increase of efficiency of RAM constituted by metallic thin films.

Keywords: RAM. Metallic thin films. Magnetron Sputtering. Stealth technology.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Imagem ilustrativa da aeronave alemã Horten Ho 229.....	19
Figura 2.2 – Imagem ilustrativa da aeronave SR-71 Blackbird.	19
Figura 2.3 – Imagem ilustrativa da aeronave Have Blue.....	20
Figura 2.4 – Imagem ilustrativa da aeronave F-117A.	21
Figura 2.5 – Imagem ilustrativa da aeronave Northrop B-2 Spirit.....	21
Figura 2.6 – Ilustração representativa de deposição de filme pelo processo de sputtering. 27	
Figura 2.7 – Comparação esquemática entre os processos de sputtering convencional e magnetron sputtering. Cinética das partículas: (a) sputtering convencional; (b) magnetron sputtering.....	28
Figura 2.8 – Processo de formação de filme sobre substrato. (a) chegada de um átomo na superfície, podendo deslocar-se sobre a superfície; (b) chegada do segundo átomo combinando com o primeiro; (c) nucleação e formação de ilhas de átomos; (d) crescimento das ilhas; (e) coalescência das ilhas; (f) formação de um filme contínuo.	29
Figura 3.1 – Microscopia óptica dos substratos com diferentes geometrias de malha. (a) substrato T1; (b) substrato T2.....	31
Figura 3.2: Análise de TGA e DTG do substrato polimérico T1.	32
Figura 3.3 – Equipamento de deposição de filmes finos da UNITAU. (a) imagem geral do equipamento; (b) porta amostra.....	33
Figura 3.4 – Imagem ilustrativa do alvo de Al acoplado ao magnetron. (a) equipamento desligado; (b) alvo sendo bombardeado por íons de Al evidenciando o plasma iluminando o alvo.	35
Figura 3.5 – Esquema ilustrativo do método de caracterização por guia de onda. (a) técnica sem placa refletora; (b) técnica com placa refletora.....	36
Figura 3.6 – Analisador de redes escalar utilizado na caracterização dos filmes.....	36
Figura 4.1 – Curvas de atenuação dos filmes de Al com diferentes espessuras sobre o substrato T1.	39
Figura 4.2 – Curvas de atenuação dos filmes de Al com diferentes espessuras sobre o substrato T2.	40
Figura 4.3 – Curvas comparativas entre T1 e T2 em função da variação da espessura do filme de Al. (a) frequência de máxima atenuação, (b) largura a meia altura, (c) atenuação máxima.	43

Figura 4.4 – Curvas de atenuação comparativas entre filmes de Al contínuo e descontínuo.
(a) filme sobre Mylar®; (b) filme sobre Melinex®..... 45

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Influência do RCS no valor da faixa de detecção.....	23
Tabela 2.2– Valores de RCS para objetos e aeronaves convencionais, e aeronaves com tecnologia furtiva.....	24
Tabela 3.1 – Condições de deposição utilizadas para a obtenção dos filmes finos.....	34
Tabela 4.1 – Dados das curvas de refletividade dos filmes de Al sobre o substrato T1.	40
Tabela 4.2 - Dados das curvas de refletividade dos filmes de Al sobre o substrato T2.	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al	Alumínio
AMR	Divisão de Materiais
Ar	Argônio
CGEE	Centro de Gestão de Estudos Estratégicos
CVD	Chemical vapour deposition (Deposição química a vapor)
DTG	Derivative thermogravimetry (Termogravimetria derivada)
EUA	Estados Unidos da América
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
IAE	Instituto de Aeronáutica e Espaço
IEAv	Instituto de Estudos Avançados
ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica
MARE	Material absorvedor de radiação eletromagnética
MS	Magnetron Sputtering
PVD	Physical vapour deposition (Deposição física a vapor)
RCS	Radar cross section (Seção reta radar)
TGA	Thermogravimetric analysis (Análise termogravimétrica)
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UNIFESP	Universidade Federal de São Paulo
UNITAU	Universidade de Taubaté

LISTA DE SÍMBOLOS

P_r	Potência atenuada pelo radar receptor
P_t	Potência transmitida do radar emissor
G_t	Ganho do transmissor
G_r	Ganho do receptor
σ	Valor de RCS
λ	Comprimento de onda
R	Faixa de detecção
dB	Decibel
$f_{m\acute{a}x}$	Frequência de máxima atenuação
$w_{1/2h}$	Largura a meia altura
\AA	Angstrom

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 JUSTIFICATIVA	16
1.2 OBJETIVOS	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 TECNOLOGIA FURTIVA	18
2.1.1 Aspectos Históricos - Aeronaves	18
2.1.2 Radar Cross Section	22
2.1.3 MARE	24
2.1.4 Panorama Nacional	25
2.2 FILMES FINOS METÁLICOS ABSORVEDORES DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA	26
2.2.1 Técnica de Obtenção	26
2.2.2 Crescimento dos Filmes Finos	28
2.2.3 Princípios de Atenuação da Radiação Eletromagnética por Filmes Finos	29
3 MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1 SUBSTRATOS	31
3.2 ANÁLISE TÉRMICA DOS SUBSTRATOS	32
3.3 EQUIPAMENTO DE DEPOSIÇÃO	33
3.4 CARACTERIZAÇÃO DA ATENUAÇÃO	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
4.1 AVALIAÇÃO DOS FILMES DESCONTÍNUOS	38
4.2 COMPARAÇÃO ENTRE FILMES DESCONTÍNUOS E CONTÍNUOS	44
5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	47
5.1 CONCLUSÃO	47
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	49
REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia furtiva baseia-se, principalmente, na utilização de técnicas que minimizem a seção reta radar (RCS – Radar Cross Section) de um objeto (DIAS et al., 2000), seja ele uma aeronave, embarcação, plataformas marítimas, entre outros. A redução da RCS faz com que o objeto seja identificado pelo radar como um objeto com dimensões menores do que as reais, como por exemplo, é possível que uma aeronave que faça uso de tecnologia furtiva seja identificada pelo radar como um pássaro de pequeno porte (INTERNATIONAL ENCYCLOPEDIA OF COMPOSITES, 1991; DIAS et al., 2000).

A redução da RCS pode ser promovida por quatro métodos diferentes: alteração na geometria da plataforma, aplicação de MARE, cancelamento passivo e cancelamento ativo. Dentre esses métodos, os principais e mais utilizados são a alteração de geometria e aplicação de MARE.

Os MARE convencionais, na maioria das vezes, possuem gramaturas e espessuras que dificultam a sua utilização em algumas aplicações, como por exemplo, em aeronaves, pois implicam no aumento de peso e na necessidade de alterações de projeto (SOETHE, 2009). Neste sentido, verifica-se que as principais desvantagens da aplicação de MARE convencional em aeronaves recaem em:

- dificuldade em realizar manobras e atingir velocidades supersônicas, devido ao aumento de peso, mudança do perfil aerodinâmico e aumento de atrito com o ar;
- limitação na quantidade de carga útil;
- custo elevado de fabricação e aplicação de MARE.

Tendo em vista as dificuldades apontadas para a aplicação de MARE convencional em diferentes plataformas, verifica-se frequentemente na literatura a busca pelo desenvolvimento de MARE cada vez mais eficientes e que ao mesmo tempo apresentem baixas densidade e espessura (DIAS et al., 2000; GOVINDASWAMY et al., 2004). Um tipo de MARE em estudo atualmente é aquele baseado em filmes finos metálicos (SOETHE, 2009; QUADROS et al., 2013). Esse tipo de material apresenta espessura na ordem de nanômetros, e densidade reduzida, quando comparada à dos MARE convencionais. Dessa forma, o peso do objeto, que é um fator crítico para aplicações no segmento aeronáutico, sofre alterações muito pequenas.

1.1 JUSTIFICATIVA

O domínio da tecnologia de materiais absorvedores de radiação eletromagnética é vital para equiparar o Brasil aos demais países, como EUA e Rússia, que já fazem uso de MARE. Isso é justificado pelo fato de os MARE possuírem aplicações tanto militares como civis, podendo citar sua aplicação nas áreas de telecomunicações, médicas, automotiva e de engenharias, em geral. Mas por se tratar de uma tecnologia de caráter estratégico de defesa, a aquisição desses materiais é onerosa, devido aos tramites burocráticos (SOETHE, 2009; Brandt Innovative Technologies, 2012).

O presente trabalho de conclusão de curso possui o intuito de dar continuidade às pesquisas iniciadas na Divisão de Materiais do Instituto de Aeronáutica Espaço (AMR/IAE) na área de materiais absorvedores de radiação eletromagnética, a qual teve o suporte financeiro do Ministério da Defesa e da FINEP. A linha de pesquisa de MARE baseados em filmes finos metálicos teve início no Brasil no ano de 2005, com a tese de doutorado da orientadora do presente trabalho, sendo desta forma, uma área bastante recente.

Considerando esse fato, esse campo de pesquisa tem muitos desafios a serem investigados, principalmente no que se refere aos MARE baseados em filmes finos metálicos, até que seja possível sua aplicação no setor aeroespacial, e nos demais setores, por meio de certificações e homologações dos materiais.

1.2 OBJETIVOS

No presente trabalho busca-se investigar a influência de substratos descontínuos no processo de atenuação da radiação eletromagnética na faixa de micro-ondas por filmes finos metálicos de alumínio.

Ao longo do desenvolvimento do trabalho, deseja-se que alguns objetivos específicos sejam alcançados, dentre os quais se podem citar:

- i. Obtenção de filmes finos de alumínio sobre substrato do tipo malha com espessuras na ordem de nanômetros pelo processo de deposição a plasma denominado Magnetron Sputtering;
- ii. Caracterização dos filmes pela técnica de guia de ondas na faixa de frequências de micro-ondas;

- iii. Comparação das características de atenuação dos filmes finos sobre substrato do tipo malha com diferentes configurações;
- iv. Comparação do comportamento de atenuação entre filmes de Al contínuos e descontínuos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica dos conceitos mais relevantes para o desenvolvimento e compreensão da pesquisa apresentada no presente trabalho.

Primeiramente, são abordados tópicos relacionados à tecnologia furtiva de aeronaves, partindo de uma perspectiva histórica. Na sequência é discutido a respeito do significado de RCS e como ela está relacionada com a tecnologia furtiva, e qual o panorama nacional atual deste tipo de tecnologia.

Na segunda parte, são abordados conceitos relativos à tecnologia de filmes finos metálicos absorvedores de radiação eletromagnética, apresentando o método de deposição adotado neste trabalho, as etapas de crescimento de um filme e o princípio físico de atenuação da radiação por filmes finos metálicos.

2.1 TECNOLOGIA FURTIVA

2.1.1 Aspectos Históricos - Aeronaves

O homem sempre tentou se esconder de seus inimigos em situações de conflito. Isso significa que ele não poderia ser visto por seu inimigo, ou seja, a região da luz visível do espectro eletromagnética era atenuada.

Com o desenvolvimento tecnológico ao longo dos anos, foram surgindo os sistemas de radares, os quais expandiram a utilização humana do espectro eletromagnético. Hoje, os setores de defesa militar desenvolvem sistemas capazes de reduzir a observação de seus equipamentos, de modo a permanecerem “invisíveis” aos seus inimigos.

Zikidis, Skondras e Tokas (2014) apresentam uma breve perspectiva histórica do desenvolvimento da tecnologia furtiva em aeronaves, que está descrita na sequência.

Historicamente, a aeronave alemã Horten Ho 229, apresentada na Figura 2.1, foi a primeira a ser construída com característica furtiva, no período da 2ª Guerra Mundial. Para que ela possuísse a capacidade de absorver as ondas de radar, era incorporada uma tinta de grafite especial. Entretanto, esta aeronave nunca entrou em operação.

Figura 2.1 – Imagem ilustrativa da aeronave alemã Horten Ho 229.



Fonte: Disponível em <http://www.pontotechno.com.br/2013/06/horten-ho-229.html>, acessado em 24 de Junho/2014.

Até a década de 70, as três principais aeronaves que apresentaram características furtivas foram a aeronave britânica Avro Vulcan e duas americanas produzidas pela Lockheed, a U-2 Dragon Lady e a mais marcante, SR-71 Blackbird, que pode ser visualizada na Figura 2.2. Apesar dos esforços realizados no desenvolvimento de tecnologia furtiva nessas aeronaves, elas eram facilmente detectadas pelos radares em operação da época.

Figura 2.2 – Imagem ilustrativa da aeronave SR-71 Blackbird.



Fonte: Disponível em <http://www.globalsecurity.org/intell/systems/sr-71.htm>, acessado em 04 de Julho/2014.

Na década de 60, o físico russo Petr Ufimtsev estudou o espalhamento das ondas eletromagnéticas, desenvolvendo equações para a predição da reflexão de ondas eletromagnéticas promovidas por formas bidimensionais simples (UFINTSEV, 1962). Baseando-se nessa teoria, foi possível concluir que o retorno do radar está relacionado, principalmente, com a configuração de borda do objeto e não tanto com o seu tamanho (ZIKIDIS; SKONDRAS; TOKAS, 2014).

Com os avanços na tecnologia de computadores durante os anos 70, engenheiros americanos puderam realizar simulações computacionais usando conceitos do trabalho de Ufimtsev. Desse modo, em meados de 1975, a Lockheed construiu duas aeronaves demonstrativas com o codinome Have Blue, que pode ser observada na Figura 2.3. Apesar de terem sido perdidas, devido a um incêndio dos motores durante o voo, o programa foi considerado um sucesso, pois foi possível provar o conceito de que um avião pode ser usuário de tecnologia furtiva.

Figura 2.3 – Imagem ilustrativa da aeronave Have Blue.



Fonte: Disponível em http://www.f117sfa.org/f117_history.htm, acessado em 24 de Junho/2014.

Após o sucesso do projeto Have Blue, os EUA concederam, em 1978, um contrato a Lockheed para o desenvolvimento de uma aeronave furtiva, o F-117A, apresentada na Figura 2.4. O primeiro voo do F-117A ocorreu em 1981 e a sua capacidade operacional máxima só foi alcançada em 1983, tendo sido construídas ao todo 64 aeronaves. O F-117A esteve em praticamente todos os conflitos dos EUA até a sua aposentadoria em 2008. Durante todo esse período, apenas uma aeronave foi abatida na guerra de Kosovo. Ela foi abatida, porque o Batalhão de Defesa Área Sérvio utilizou um radar modificado de maior detecção que o até então utilizado.

Figura 2.4 – Imagem ilustrativa da aeronave F-117A.



Fonte: Disponível em http://www.military-today.com/aircraft/lockheed_f117_nighthawk.htm, acessado em 25 de Junho/2014.

O F-117A era uma aeronave de curto alcance e por esse motivo, logo após a decisão da sua produção, os EUA decidiu investir no desenvolvimento de um bombardeiro de longo alcance. Com isso, surgiu o bombardeiro furtivo, subsônico, de quatro motores, Northrop B-2 Spirit, apresentado ilustrativamente na Figura 2.5. O B-2 chega a qualquer lugar no mundo, uma vez que possui reabastecimento em voo. Os princípios referentes à capacidade furtiva do B-2 foram aplicados, posteriormente, no Rockwell B1, resultando em um bombardeiro supersônico, o B1-B Lancer.

Figura 2.5 – Imagem ilustrativa da aeronave Northrop B-2 Spirit.



Fonte: Disponível em <http://www.aereo.jor.br/2010/03/04/northrop-vai-consertar-a-traseira-dos-b-2/>, acessado em 04 de Julho/2014.

As aeronaves F-117A, B-2 e B1-B foram o início do desenvolvimento de aeronaves com tecnologia furtiva, tendo apresentado resultados satisfatórios. A partir delas, muitas outras foram desenvolvidas, tanto pelos EUA com pela Rússia, China, França, entre outros (ZIKIDIS; SKONDRAS; TOKAS, 2014).

2.1.2 Radar Cross Section

Knott, Shaeffer e Tuley (2004) definem a RCS como uma medida da potência de espalhamento em uma determinada direção quando um objeto é iluminado por uma onda incidente. A RCS é normalizada pela densidade de potência de uma onda incidente em um objeto. Portanto, ela não depende da distância entre o objeto e a fonte da radiação incidente.

De maneira mais simplificada, a RCS é uma medida do quão detectável um objeto é pelo radar. Quanto maior o valor de RCS, mais detectável é um objeto (ZIKIDIS; SKONDRAS; TOKAS, 2014). Desse modo, uma aeronave classificada como furtiva é aquela que possui um baixo valor de RCS.

É possível avaliar a importância da redução da RCS na aplicação da tecnologia furtiva a partir da equação de radar (Equação 2.1), como demonstra Cadirci (2009):

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \quad (2.1)$$

onde:

P_r ≡ potência atenuada pelo radar receptor [watts];

P_t ≡ potência transmitida do radar emissor [watts];

G_t ≡ ganho do transmissor;

G_r ≡ ganho do receptor;

σ ≡ RCS [m²];

λ ≡ comprimento de onda [m];

R ≡ faixa de detecção [m].

Como a faixa de detecção é um fator importante para a capacidade furtiva, a equação de radar pode ser descrita ainda pela Equação 2.2:

$$R = \left[\frac{P_t G_t G_r \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 P_r} \right]^{1/4} \quad (2.2)$$

Como é possível observar na Equação 2.2, a faixa de detecção (ou a distância do radar ao alvo) varia com a raiz quarta do RCS. Além disso, o valor de RCS é o único fator que pode ser alterado para que haja uma redução do sinal de detecção, uma vez que os outros parâmetros são ajustados pelo inimigo.

No entanto, pelo fato de a detecção diminuir com a raiz quarta da RCS, fica evidente que somente uma mudança acentuada da RCS proporciona uma redução de detecção considerável. Cadirci (2009) apresenta uma simulação da influência da variação da RCS no valor da faixa de detecção, mostrada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Influência da RCS no valor da faixa de detecção.

RCS [m ²]	Faixa de detecção [km]	Redução da faixa de detecção [%]
1000	508,92	-
100	286,19	43,77
81	271,50	46,65
10	160,93	68,38
5	135,33	73,41
1	90,49	82,22

Fonte: Adaptado de Cadirci (2009).

Portanto, como visto na Tabela 2.1, quanto menor o valor do RCS menos detectável um objeto se torna. A Tabela 2.2 apresenta uma comparação de valores de RCS entre objetos e aeronaves convencionais, e aeronaves que são conhecidas por possuir tecnologia furtiva.

Tabela 2.2– Valores de RCS para objetos e aeronaves convencionais, bem como para aeronaves com tecnologia furtiva.

Objeto	RCS [m ²]
Jato jumbo	100
C-130 Hercules	80
Bombardeiro B-47	40
F-15 Eagle	25
Bombardeiro B-1B	1
Homem	1
B-1B Lancer	0,75
B-2 Spirit	0,1
F-117A	0,025
Pássaro	0,01
F-22 Raptor	0,0005
Inseto	0,00001

Fonte: Adaptado de Zikidis, Skondras e Tokas (2014) e Dias et al. (2000).

Segundo Knott, Shaeffer e Tuley (2004) há quatro métodos para a redução da RCS: modificação de forma ou geometria do objeto a ser detectado, utilização de MARE, cancelamento passivo e cancelamento ativo. Entre esses métodos, o presente trabalho possui um enfoque na utilização de MARE à base de filmes finos metálicos para reduzir a detecção de objetos, que podem ser empregados nas áreas civil e militar.

2.1.3 MARE

Os materiais absorvedores transformam a energia proveniente da radiação eletromagnética em energia térmica (DIAS et al., 2000), ou seja, a energia absorvida pelo material é liberada sob a forma de calor, reduzindo o sinal que retorna ao radar de detecção.

Os MARE são classificados em absorvedores dielétricos, magnéticos e híbridos (SIMÕES; NOHARA; REZENDE, 2006). Como exemplo de absorvedores dielétricos pode-se citar matrizes poliméricas aditadas com pequenas partículas de carbono ou grafite, ao passo que dentre os absorvedores magnéticos, pode-se verificar as matrizes poliméricas aditadas com ferrita e ferro carbonila (DIAS et al., 2000).

Os filmes finos são classificados como absorvedores dielétricos, entretanto, por se tratar de uma tecnologia recente, outros estudos são necessários para compreender os reais mecanismos que regem o processo de absorção da radiação eletromagnética por estes materiais (SOETHE, 2009).

2.1.4 Panorama Nacional

O estudo e o desenvolvimento de MARE no Brasil ainda são considerados incipientes. É possível notar esta situação avaliando-se o baixo número de material bibliográfico nacional disponível referente ao assunto, sejam impressos ou por meio eletrônico.

Além disso, o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos - CGEE (2010) afirma que no Brasil não são produzidos materiais do tipo MARE em escala industrial, apesar de haver mercado potencial para tal. Como exemplo, ele cita o caso dos aparelhos celulares que vem sendo crescentemente comercializados, como pode ser visto em números: só no ano de 2008 foram vendidos 30 milhões de aparelhos. Além disso, o emprego deste tipo de material poderia ser estendido para os mercados automotivo, eletrônico, militar, médico, entre outros.

No relatório do CGEE, há a proposta de que sejam industrializadas as soluções nacionais já desenvolvidas, em nível de protótipo pelos órgãos de pesquisa nacionais, gerando assim inovação de modo a atender as demandas civis e militares.

Atualmente, o Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) coopera com o Instituto de Estudos Avançados (IEAv), atuando em nível de pós-graduação e de iniciação científica nas áreas de blindagem eletromagnética, no estudo de materiais compósitos estruturais poliméricos e revestimentos de alta absorção de radiação eletromagnética (CGEE, 2010).

No caso dos filmes finos absorvedores, os estudos e o desenvolvimento de técnicas de produção, tiveram início no Brasil em 2005, com a aprovação de um projeto FINEP/MARE e o apoio do Ministério da Defesa. Coube à Divisão de Materiais (AMR) do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) o desenvolvimento dessa linha de pesquisa (SOETHE, 2009). No momento, alguns grupos de pesquisa vêm trabalhando com soluções envolvendo MARE à base de filmes finos, dentre os quais se podem citar aqueles de pesquisadores/professores da Universidade de Taubaté (UNITAU), Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP) e da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), do Campus de Joinville.

2.2 FILMES FINOS METÁLICOS ABSORVEDORES DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Nesta seção são apresentados três tópicos importantes, referentes a filmes finos metálicos absorvedores de radiação eletromagnética, sendo eles a técnica de deposição utilizada para a obtenção dos filmes, as etapas de crescimento de filmes, e os princípios físicos que regem o fenômeno da atenuação por filmes.

2.2.1 Técnica de Obtenção

Atualmente, existem diversas técnicas de obtenção de filmes finos. Duas das mais empregadas são o CVD (Chemical Vapour Deposition) e o PVD (Physical Vapour Deposition). No processo CVD, os filmes são formados sobre um substrato por meio de reações químicas de um composto volátil que é depositado. Nos processos PVD, são arrancadas espécies do material a ser depositado, por meio de processos físicos, como evaporação e impacto de íons (OHRING, 1992).

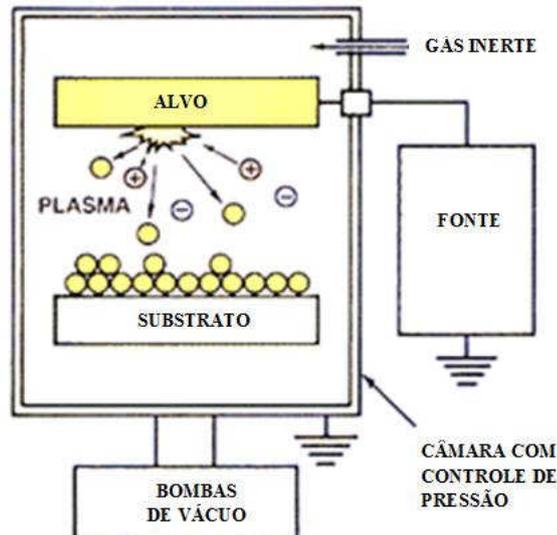
No presente trabalho, utilizou-se um processo físico de deposição PVD à plasma, denominado sputtering. Segundo Chapman (1980), plasma é um meio eletricamente neutro, o qual é composto de elétrons e íons positivos em uma região de átomos neutros. Os plasmas podem ser classificados como sendo de alta ou baixa-temperatura (BOGAERTS et al., 2002). Devido ao substrato utilizado neste trabalho ser um polímero estável a temperaturas inferiores a 200°C, optou-se pelo sputtering, uma vez que o plasma gerado classifica-se como de baixa-temperatura.

Konuma (1992) descreve o fenômeno físico do processo de sputtering como sendo o bombardeamento de uma superfície sólida por partículas energéticas, como íons ou átomos neutros, onde material é ejetado da superfície, através da transferência de momento e energia.

Na prática, esse processo ocorre em uma câmara com controle de pressão, onde é injetado um gás de trabalho. Uma descarga elétrica é gerada por meio de uma diferença de potencial entre dois eletrodos posicionados dentro da câmara: um cátodo, onde está posicionado o material a ser depositado (alvo) e um anodo, no qual está alojado o substrato. A descarga elétrica gerada promove a formação de íons positivos e elétrons (plasma). Os íons são acelerados pelo campo elétrico a frente do cátodo, arrancando material do alvo, que por sua vez se depositam sobre o substrato (BOGAERTS et al., 2002). A Figura 2.6 ilustra como

ocorre o processo de sputtering dentro de uma câmara com controle de pressão, descrito anteriormente.

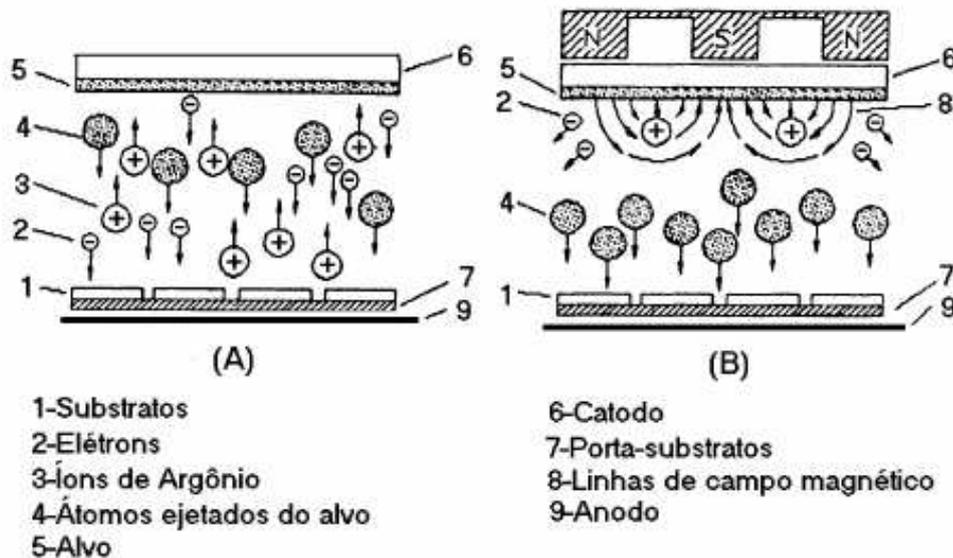
Figura 2.6 – Ilustração representativa de deposição de filme pelo processo de sputtering.



Fonte: Disponível em <http://www.tcbonding.com/sputtering.html>, acessado em 11 de Junho/2014.

No presente trabalho, as amostras foram obtidas pelo processo de magnetron sputtering, o qual é um aperfeiçoamento da técnica de sputtering convencional. Nesta técnica é inserido um conjunto de ímãs permanentes na parte posterior do cátodo, de modo a aumentar a eficiência do processo, uma vez que as linhas de campo aprisionam elétrons fazendo-os espiralar proporcionando um aumento na taxa de ionização do plasma. O aumento da taxa de ionização gera um maior bombardeamento do alvo, fazendo com que a quantidade de átomos arrancados do alvo aumente (SOETHE, 2004). A Figura 2.7 apresenta, de forma esquemática, uma comparação entre os processos de sputtering convencional e o magnetron sputtering.

Figura 2.7 – Comparação esquemática entre os processos de sputtering convencional e magnetron sputtering. Cinética das partículas: (a) sputtering convencional; (b) magnetron sputtering.



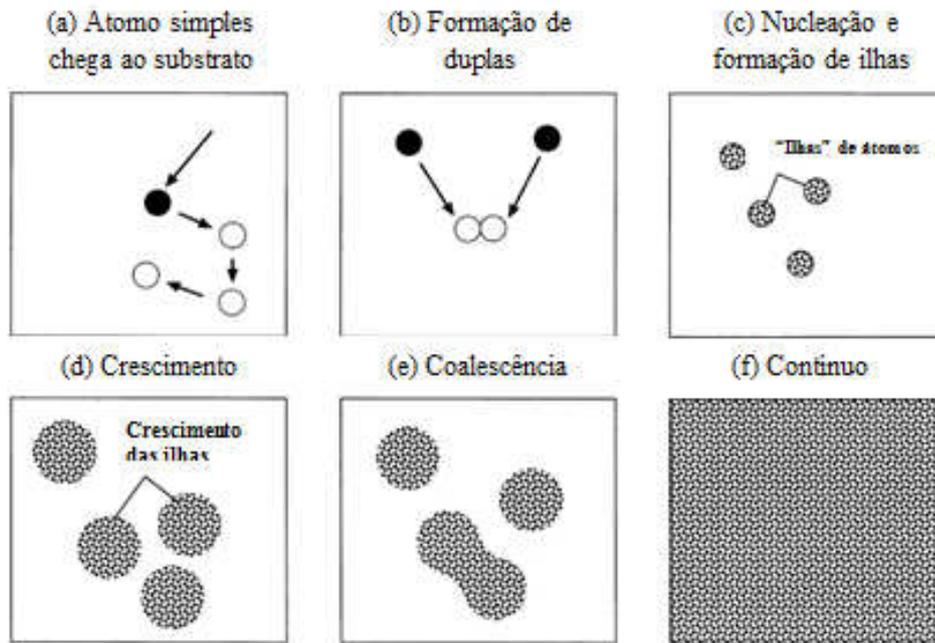
Fonte: Filho (1991).

2.2.2 Crescimento dos Filmes Finos

No processo de crescimento dos filmes finos sobre o substrato, dois parâmetros são importantes: a temperatura do substrato e a pressão do gás de trabalho. O controle desses dois parâmetros afeta diretamente a microestrutura dos filmes, que por sua vez influenciam as propriedades dos filmes, como rugosidade, resistividade elétrica e tensões intrínsecas (SOETHE, 2004).

Basicamente, todas as fases de formação do filme sobre o substrato incluem o processo de nucleação e crescimento (OHRING, 1992). A Figura 2.8 apresenta, de maneira simplificada, cada etapa do processo de formação de um filme fino.

Figura 2.8 – Processo de formação de filme sobre substrato. (a) chegada de um átomo na superfície, podendo deslocar-se sobre a superfície; (b) chegada do segundo átomo combinando com o primeiro; (c) nucleação e formação de ilhas de átomos; (d) crescimento das ilhas; (e) coalescência das ilhas; (f) formação de um filme contínuo.



Fonte: Adaptado de Bogaerts et al. (2002).

Como é possível se observar na Figura 2.8, a formação do filme começa com a chegada do primeiro átomo sobre a superfície do substrato (a) que em seguida, com a chegada do segundo (b) e dos demais, formam-se as ilhas atômicas (c). Essas ilhas crescem (d) à medida que mais átomos chegam, até o ponto dessas ilhas coalescerem (e). Ao final da coalescência de todas as ilhas, forma-se um filme contínuo (f) sobre o substrato (OHRING, 1992).

Para que o crescimento do filme de fato ocorra, é necessário que uma condição termodinâmica importante seja atendida: a pressão, no interior da câmara de deposição, dos átomos formadores do filme, deve ser maior que sua pressão de vapor (NEUGEBAUGER, 1970).

2.2.3 Princípios de Atenuação da Radiação Eletromagnética por Filmes Finos

A descrição dos princípios físicos envolvidos no processo de atenuação da radiação eletromagnética por filmes finos é escassa na literatura. Isso se deve ao fato de que essa tecnologia possui um caráter estratégico com aplicação no setor de defesa militar. Portanto, o

material bibliográfico disponível referente a esse tema é superficial e sem o aprofundamento necessário para o entendimento dos princípios físicos que governam o fenômeno.

Em estudos realizados por Takizawa e Hashimoto (1999) e Bosman, Lau e Gilgenbach (2004) foi observado que filmes finos metálicos possuem a capacidade de atenuação de radiação eletromagnética, pois se assemelham a um circuito elétrico resistivo, que por efeito Joule, proporcionam a transformação da energia eletromagnética em calor.

Estudos recentes desenvolvidos por Soethe (2009) identificaram esse caráter absorvedor dos filmes finos, com espessuras da ordem de dezenas de nanômetros, as quais são próximas ou menores que a espessura de skin depth (profundidade de penetração).

A espessura de skin depth é definida como a profundidade na qual as correntes induzidas – conhecidas como correntes de Eddy - devido à variação do fluxo magnético através de uma amostra de material condutor, penetram na superfície desse material (KAISER, 2005). Uma vez que a espessura do filme está abaixo da espessura de skin depth, a onda eletromagnética incidente sobre a superfície do filme consegue penetrar na mesma, promovendo assim à formação das correntes de Eddy.

Filmes metálicos com espessura da ordem de nanômetros apresentam uma estrutura descontínua, que dependendo do processo e da forma de deposição, apresentam estruturas de ilhas sobre o substrato, que por sua vez aumentam a resistividade do material, ampliando a transformação da energia da radiação eletromagnética, que gerou as correntes de Eddy, em calor (SOETHE, 2009). O efeito das discontinuidades na característica de absorção da radiação eletromagnética por filmes finos é o foco do presente trabalho.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

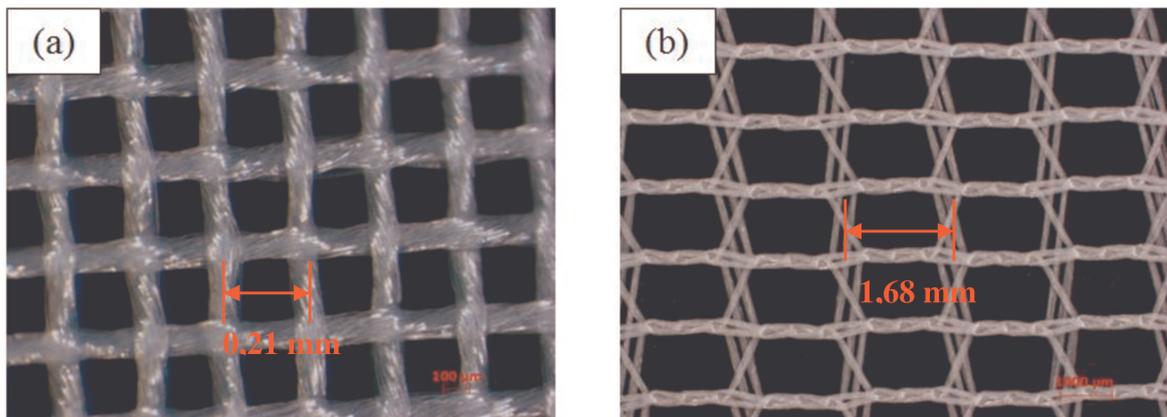
Neste capítulo é apresentado o procedimento experimental utilizado no desenvolvimento deste TCC. Inicialmente, são apresentadas as características dos substratos utilizados, bem como a análise térmica dos substratos. Além disso, é apresentado um detalhamento do equipamento de deposição, e as técnicas de caracterização dos filmes finos metálicos empregados no desenvolvimento do presente trabalho.

3.1 SUBSTRATOS

No presente trabalho foram selecionados dois substratos poliméricos do tipo malha, com diferentes configurações geométricas. Como mencionado anteriormente, o intuito da utilização deste tipo de substrato é induzir a formação de recobrimentos com descontinuidades, de modo a verificar o comportamento da atenuação desses filmes depositados em relação a filmes contínuos.

Os dois substratos utilizados podem ser visualizados na Figura 3.1. Eles se diferem, principalmente, com relação à distância entre nós consecutivos. O substrato T1 - Figura 3.1 (a) – possui uma distância de 0,21 mm entre nós e o substrato T2 – Figura 3.1 (b) – uma distância de 1,68 mm. As imagens foram obtidas por meio de um estereoscópio da marca Zeiss modelo Discovery V8, sendo que a imagem de T1 apresenta um aumento de 63 X, e T2 um aumento de 12,5 X.

Figura 3.1 – Microscopia óptica dos substratos com diferentes geometrias de malha. (a) substrato T1; (b) substrato T2.



Fonte: Autor.

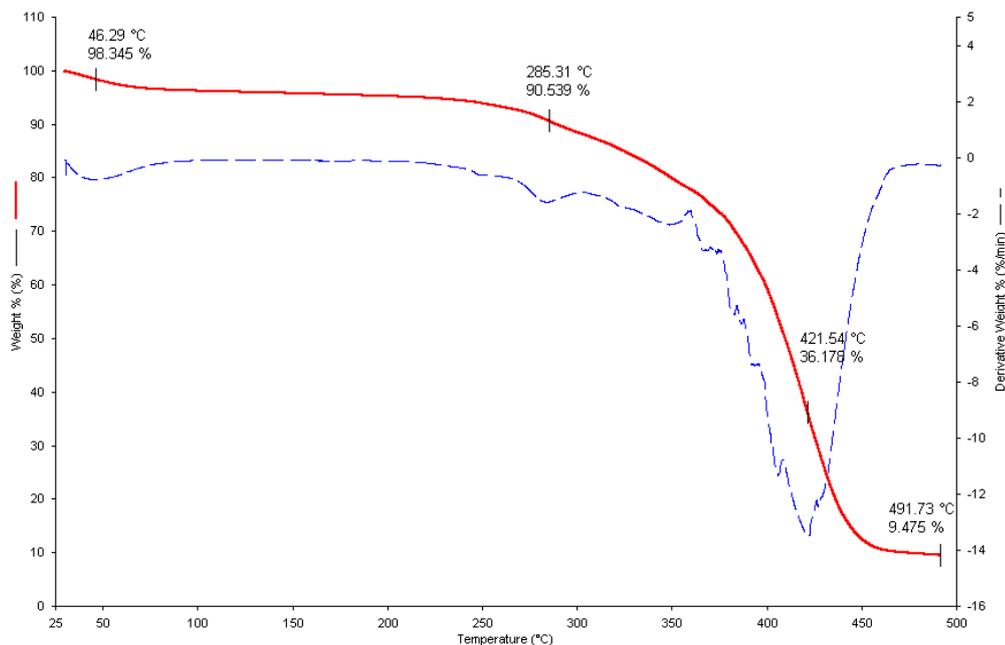
3.2 ANÁLISE TÉRMICA DOS SUBSTRATOS

Filmes finos de alumínio foram depositados sobre substratos poliméricos, com diferentes configurações geométricas de malha. A análise térmica dos substratos foi realizada de forma a verificar o comportamento dos materiais, quando sujeitos à variação de temperatura no reator a plasma. Tal avaliação é importante uma vez que durante o processo de deposição o material está sujeito a alterações térmicas.

O substrato T1 foi submetido a uma análise termogravimétrica (TGA – do inglês thermogravimetric analysis), da qual é possível verificar o comportamento deste polímero, no que diz respeito à perda de massa, em função do aumento da temperatura. Considerou-se que a composição química do substrato T2 é semelhante à de T1, inferindo assim o mesmo comportamento térmico aos dois substratos. O resultado de TGA para o substrato polimérico utilizado no presente trabalho pode ser observado na Figura 3.2.

Esta análise térmica foi realizada na AMR/IAE, em um equipamento da marca NETZSCH STA 449C. O ensaio transcorreu com aquecimento de 25°C a 500°C com uma razão constante de aquecimento de 10°C/min, em atmosfera de nitrogênio, à uma vazão de 20mL/min.

Figura 3.2: Análise de TGA e DTG do substrato polimérico T1.



Fonte: Autor.

Ainda, na Figura 3.2 é possível observar a análise de Termogravimetria Derivada (DTG – do inglês derivative thermogravimetry), na qual se verifica uma aproximação da velocidade da degradação do polímero por meio da derivada da curva obtida via análise termogravimétrica.

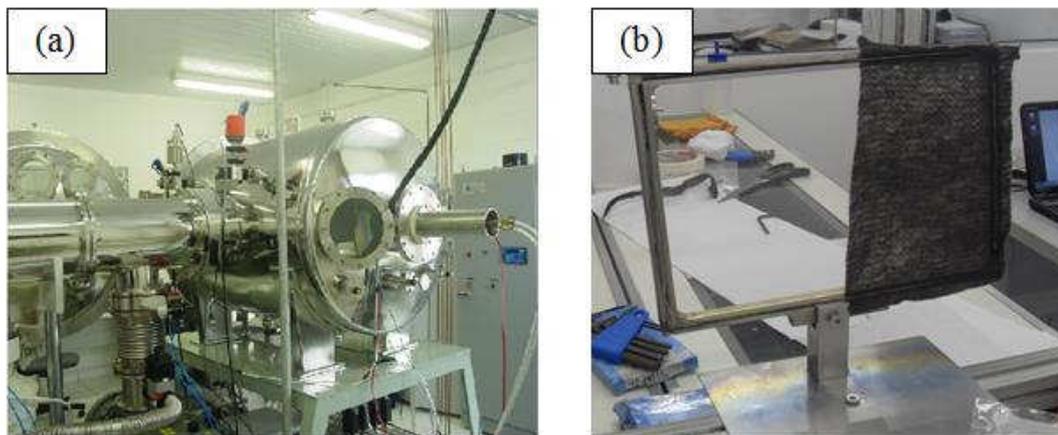
A análise de TGA indica que o polímero de trabalho possui estabilidade térmica até temperaturas próximas a 250°C. Esta é a temperatura de início de degradação, onde o polímero começa a perder massa com o aumento da temperatura. Em torno de 420 °C o material apresenta um decréscimo de massa acentuado, retardando-se com o aumento da temperatura, o que pode ser visualizado observando-se a derivada da curva de TGA, que indica a velocidade desta subtração.

Observando-se as análises de TGA conclui-se que o polímero apresenta estabilidade térmica até temperaturas próximas a 250 °C. Acima desta temperatura, o polímero entra em uma região de início de degradação, dificultando o trabalho com o mesmo, em processos onde a elevação da temperatura se faz necessária, como é o caso de processos a plasma.

3.3 EQUIPAMENTO DE DEPOSIÇÃO

O processo utilizado para a deposição dos filmes finos sobre os substratos poliméricos do tipo malha foi o Magnetron Sputtering (MS). Um equipamento do tipo MS do Laboratório de Plasma da Universidade de Taubaté (UNITAU) foi disponibilizado para a realização das deposições. A Figura 3.3 apresenta uma imagem deste equipamento, assim como do porta amostras.

Figura 3.3 – Equipamento de deposição de filmes finos da UNITAU. (a) imagem geral do equipamento; (b) porta amostra.



A deposição dos filmes finos é realizada a vácuo, sendo o equipamento disponibilizado pela UNITAU composto por três bombas: uma mecânica, uma roots e uma difusora. Para o controle dos parâmetros do processo estão acoplados ao equipamento medidores de pressão, fluxo do gás de trabalho (argônio - Ar) e de espessura com resolução da ordem de angstroms (Å). A Tabela 3.1 apresenta as condições de deposição utilizadas no presente trabalho, as quais se basearam na tese de doutorado de Soethe (2009).

Tabela 3.1 – Condições de deposição utilizadas para a obtenção dos filmes finos.

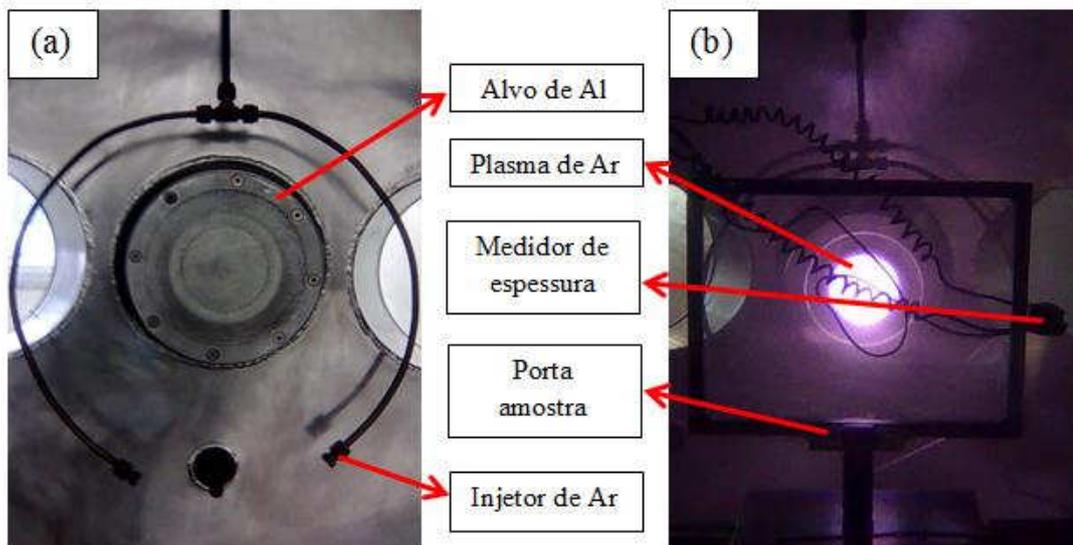
Parâmetros	Valores
Corrente [A]	0,5 – 1
Tempo de deposição [s]	20 – 40
Pressão de trabalho [mTorr]	1,5- 5
Fluxo de Ar [sccm]	200
Tensão [V]	450 - 800

Fonte: Adaptado de Soethe (2009).

O material metálico utilizado como recobrimento foi o Al, que foi escolhido em função de trabalhos anteriores realizados pela orientadora do presente projeto, Soethe (2009). No referido trabalho mostra que filmes finos deste elemento depositados sobre substratos contínuos apresentam uma boa capacidade de atenuação de radiação incidente, da ordem de 90% em filmes com espessuras nanométricas.

O alvo de Al foi acoplado a um magnetron de seis polegadas de diâmetro, o qual é refrigerado a água. A Figura 3.4 apresenta uma fotografia do magnetron com o alvo acoplado dentro do reator, e uma fotografia do equipamento em funcionamento, onde o alvo é bombardeado pelos íons de Ar.

Figura 3.4 – Imagem ilustrativa do alvo de Al acoplado ao magnetron. (a) equipamento desligado; (b) alvo sendo bombardeado por íons de Al evidenciando o plasma iluminando o alvo.



Fonte: Autor.

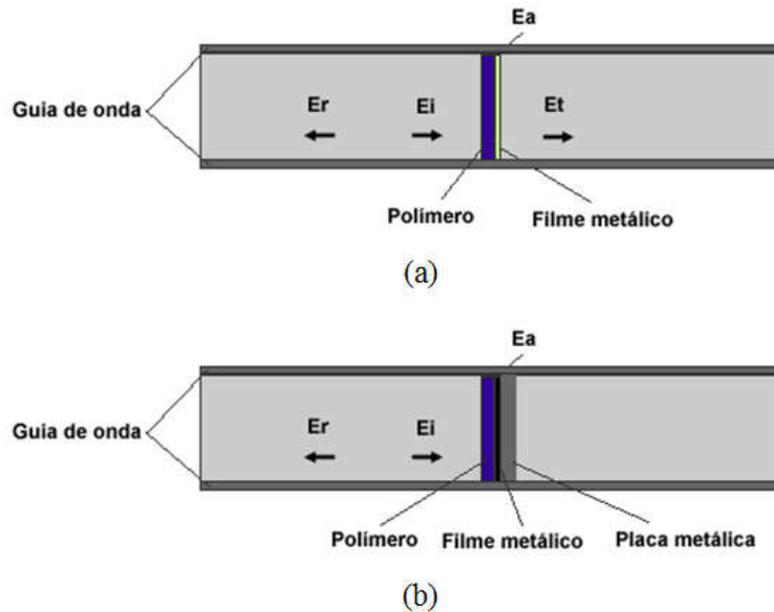
3.4 CARACTERIZAÇÃO DA ATENUAÇÃO

O método de caracterização da atenuação dos filmes foi o guia de ondas. Nesse método, a onda eletromagnética fica confinada em um guia metálico, onde, no seu interior, é posicionada a amostra a ser caracterizada (PEREIRA, 2007). Existem duas técnicas distintas para medir a atenuação do material em análise.

A primeira técnica consiste na obtenção da energia absorvida (E_a) por meio da diferença entre a energia incidente (E_i) e a energia transmitida (E_t) (SOETHE et al., 2008). Ou seja, nessa técnica é avaliada a absorção intrínseca do material. A Figura 3.5 (a) apresenta ilustrativamente essa condição de medida.

A segunda técnica consiste na colocação de uma placa 100% refletora atrás da amostra. Nesse caso, a onda eletromagnética incide sobre o conjunto amostra/placa que possui uma energia E_i , que pode ser parcialmente refletida (E_r) ou atenuada (E_a) (SOETHE et al., 2008). A Figura 3.5 (b) apresenta esquematicamente o processo de conservação de energia na técnica utilizada.

Figura 3.5 – Esquema ilustrativo do método de caracterização por guia de onda. (a) técnica sem placa refletora; (b) técnica com placa refletora.



Fonte: Soethe et al. (2008).

O equipamento utilizado para a avaliação da absorção das amostras é um analisador de redes escalar da Hewlett Packard, modelo 8757, disponibilizado pela AMR/IAE e que pode ser observado na Figura 3.6. Este equipamento mede a quantidade de energia da radiação eletromagnética incidente absorvida pelo material, por meio da medida de refletividade do mesmo, comparando-o com a refletividade de uma placa metálica de alumínio, 100% refletora. A faixa de frequências utilizada foi de 8 a 12 GHz.

Figura 3.6 – Analisador de redes escalar utilizado na caracterização dos filmes.



Fonte: Soethe (2009).

Cabe ressaltar que, o equipamento de medida de refletividade fornece o resultado da atenuação em dB. Entretanto, para uma melhor interpretação dos resultados, os gráficos apresentados no presente trabalho abordarão a atenuação em porcentagem. Neste sentido, para converter os dados fornecidos em dB para porcentagem faz-se uso da relação apresentada pela Equação 4.1 (SOETHE, 2009):

$$\textit{Atenuação} [\%] = 100(1 - 10^{0,1dB}) \quad (3.1)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente trabalho foram obtidos filmes finos de alumínio sobre dois substratos do tipo malha, sendo denominados T1 e T2, os quais possuem distâncias entre nós consecutivos de 0,21 mm e 1,68 mm, respectivamente, com espessuras variando de 50 a 100nm, pela técnica de Magnetron Sputtering. A seleção desse tipo de substrato é realizada visando induzir intencionalmente a formação de descontinuidades no filme, visando promover uma maior capacidade de atenuação, princípio este verificado nos processos de absorção de filmes finos metálicos contínuos com espessura nanométricas.

Para a caracterização dos filmes empregou-se a técnica de guia de ondas com a inserção de uma placa metálica 100% refletora, como apresentado esquematicamente na Figura 3.5 (b). Uma vez que, ela simula a aplicação do MARE em uma superfície metálica de uma aeronave. Nesta técnica, obtêm-se curvas de refletividade, ou seja, a atenuação promovida pelo conjunto amostra/placa em função da frequência da onda incidente, que no presente trabalho é da faixa de 8 a 12 GHz .

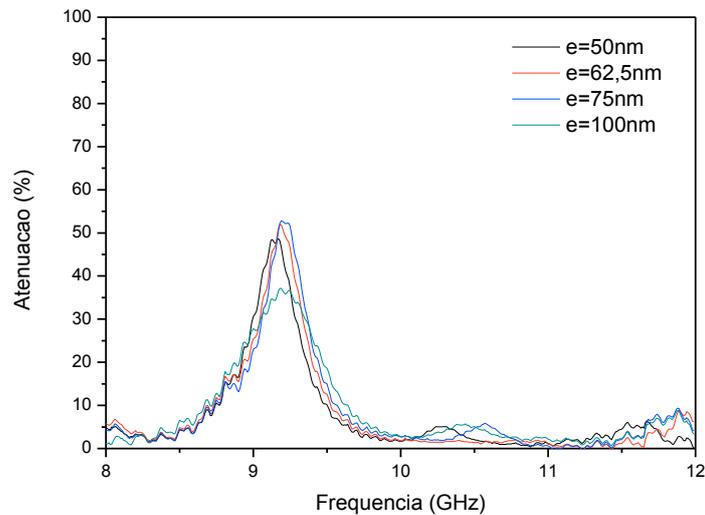
Além das avaliações realizadas nas amostras obtidas, foram feitos estudos comparativos entre as amostras com substratos do tipo malha e amostras com substratos contínuos. As curvas de refletividade das amostras com substrato contínuo foram obtidas do trabalho realizado por Soethe (2009).

4.1 AVALIAÇÃO DOS FILMES DESCONTÍNUOS

Para os substratos T1 e T2, as espessuras dos filmes de Al obtidas foram de 50 nm, 62,5 nm, 75 nm e 100 nm. As espessuras foram determinadas fazendo uso de um oscilador de cristal de quartzo no qual se verificou que, para os parâmetros de metalização utilizados, a taxa de deposição é da ordem de 2,5 nm/s.

Portanto, foram geradas quatro curvas de refletividade para cada substrato, totalizando oito amostras. Os resultados de atenuação promovida pelos filmes finos de alumínio depositados sobre o substrato T1 são apresentados na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Curvas de atenuação dos filmes de Al com diferentes espessuras sobre o substrato T1.



Fonte: Autor.

Avaliando-se a Figura 4.1, observa-se que os filmes com espessuras de 50 nm, 62,5 nm e 75 nm apresentam atenuações na ordem de 50% em frequências próximas a 9 GHz. Por sua vez, o filme com 100 nm proporciona uma atenuação máxima próxima de 40%. Em todos os filmes, nota-se que há um pequeno deslocamento do pico de atenuação sobre o eixo da frequência.

Também é possível verificar que a atenuação promovida pelos filmes ocorre em uma banda estreita de frequência. Os MARE convencionais que apresentam esse tipo de comportamento são denominados como sendo de banda estreita, onde essa condição é proporcionada pelo fenômeno de cancelamento de fases da onda.

Por meio das curvas de refletividade da Figura 4.1 é possível relacionar as espessuras dos filmes, a frequência de máxima atenuação ($f_{m\acute{a}x}$), a largura a meia altura dos picos de atenuação ($w_{1/2h}$) e a atenuação máxima. A Tabela 4.1 apresenta os dados citados para os quatro filmes de Al sobre T1.

Dos parâmetros citados, a largura a meia altura permite a identificação do quão banda larga é a atenuação promovida pela amostra. Ou seja, quanto maior o valor da largura a meia altura, maior é a faixa de frequências onde ocorre a atenuação por parte da amostra.

Tabela 4.1 – Dados das curvas de refletividade dos filmes de Al sobre o substrato T1.

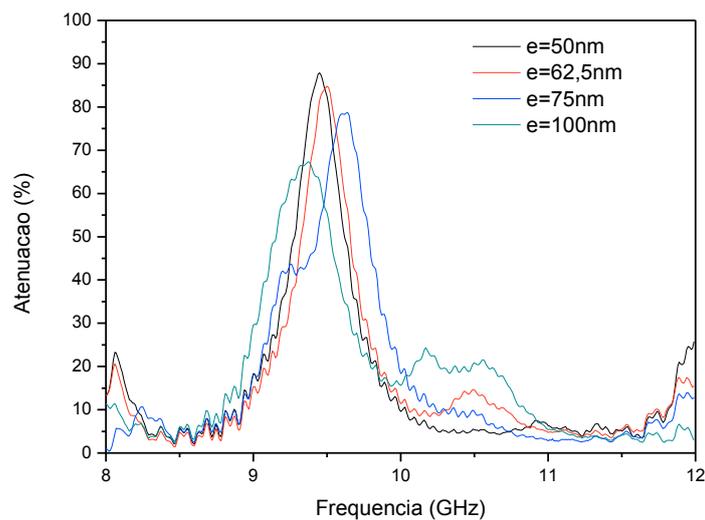
Espessura [nm]	$f_{m\acute{a}x}$ [GHz]	$w_{1/2h}$ [GHz]	Atenuação máxima [%]
50	9,17	0,36	48,7
62,5	9,18	0,36	51,9
75	9,19	0,35	52,8
100	9,18	0,65	37,2

Fonte: Autor.

Com exceção do filme de 100 nm, o aumento da espessura proporciona um ligeiro aumento da frequência de máxima atenuação, assim como da atenuação máxima. Em contrapartida, a largura a meia altura permanece praticamente constante para os filmes de 50 nm, 62,5 nm e 75 nm, e aumenta para o filme de espessura 100 nm.

Do mesmo modo, os filmes de Al sobre o substrato T2 também foram caracterizados eletromagneticamente, avaliando-se a capacidade de atenuação para a faixa de frequências de 8 a 12 GHz. A Figura 4.2 apresenta as curvas de atenuação para quatro filmes de espessuras diferentes sobre o substrato T2.

Figura 4.2 – Curvas de atenuação dos filmes de Al com diferentes espessuras sobre o substrato T2.



Fonte: Autor.

De acordo com o gráfico da Figura 4.2, observa-se que o filme de 50 nm proporciona uma atenuação próxima a 90%, diminuindo à medida que a espessura de filme aumenta até uma atenuação de aproximadamente 70%, para o filme de 100 nm. Como a variação da espessura, também há um deslocamento da frequência de atenuação máxima para valores maiores até o filme de 75 nm, e para um valor menor para a espessura de 100 nm.

Semelhante aos filmes de Al sobre o substrato T1, o comportamento das curvas é predominantemente de banda estreita. Mas, é possível verificar que a faixa de frequências onde ocorre o pico de atenuação é maior, além de que os filmes atenuaram a energia em menores proporções em outras faixas de frequências, em torno de valores centrais de 8 GHz, 10,5 GHz e 12 GHz.

Por meio das curvas apresentadas na Figura 4.2 é possível relacionar os dados de espessuras dos filmes, a frequência de máxima atenuação, a largura a meia altura dos picos de atenuação e a atenuação máxima, semelhante ao realizado para os filmes de Al sobre T1. A Tabela 4.2 apresenta esses dados para os filmes sobre T2.

Tabela 4.2 - Dados das curvas de refletividade dos filmes de Al sobre o substrato T2.

Espessura [nm]	$f_{m\acute{a}x}$ [GHz]	$w_{1/2h}$ [GHz]	Atenuação máxima [%]
50	9,45	0,42	87,9
62,5	9,50	0,39	84,8
75	9,64	0,66	78,7
100	9,37	0,60	67,3

Fonte: Autor.

De acordo com a Tabela 4.2, a frequência de atenuação máxima aumenta à medida que a espessura de filme também aumenta até 75 nm. Comparando-se o filme com 75 nm e aquele com espessura de 100 nm verifica-se que a frequência onde o pico de absorção ocorre diminui. Já a largura a meia altura possui pouca variação entre os filmes, podendo ser apenas uma faixa de erro na medição. Por sua vez, a atenuação máxima decresce à medida que a espessura aumenta, apresentando um comportamento inversamente proporcional.

Avaliando-se os resultados pode-se verificar que a espessura do recobrimento metálico influi diretamente na absorção apresentada pelos filmes finos de alumínio. Verifica-se que, filmes com espessuras menores proporcionam uma atenuação mais significativa que aquelas apresentadas pelos filmes mais espessos.

A relação da absorção com a espessura é relatada por Soethe (2009), na qual verifica que, quando o recobrimento metálico apresenta espessura da ordem de nanômetros, a radiação eletromagnética incidente penetra no material e sofre perdas por processos de transformação de energia. Entretanto, para que este processo de absorção seja efetivo, é necessário que algumas discontinuidades estejam presentes no recobrimento, atuando como pontos de espalhamento e resistência à passagem das correntes de Eddy formadas na superfície (FUJIEDA et al., 2007).

A relação entre a frequência de máxima absorção e a espessura recai na capacidade que o conjunto apresenta em realizar uma menor reflexão da radiação eletromagnética, ou seja, na frequência onde é verificado um pico de absorção ocorre um maior casamento de impedância entre o ar e o material analisado. Assim, dependendo da espessura do recobrimento, o conjunto filme/substrato promove em algumas faixas de frequência, processos de interferência construtiva e/ou destrutiva entre as ondas eletromagnéticas incidentes e refletidas. Estes processos de interferência irão influenciar na frequência em que ocorre o pico de absorção.

A influência da configuração do substrato, ou seja, da distância entre dois nós consecutivos, na absorção apresentada pelos filmes finos também é significativa, como mostram os resultados. Verifica-se, observando a Figura 4.1, que os filmes finos depositados sobre o substrato T1 (0,21 mm) apresentam máximos de absorção menores que àqueles evidenciados para os filmes depositados sobre o substrato T2 (1,68 mm), mostrados na Figura 4.2.

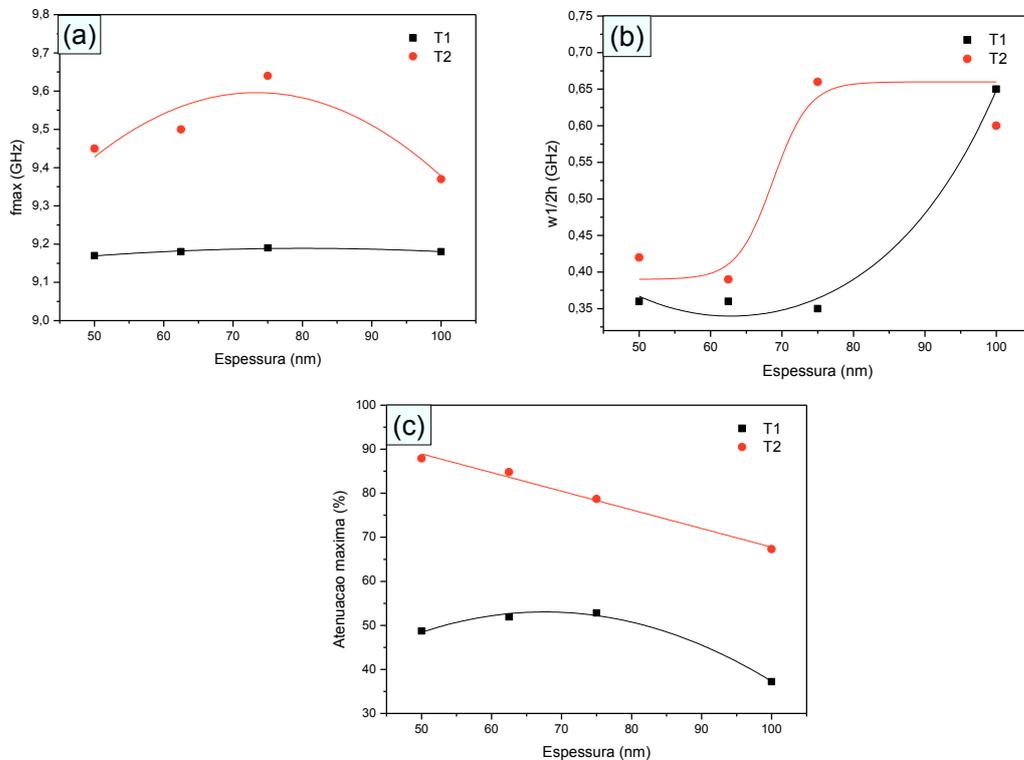
A diferença entre os resultados de atenuação certamente relacionam-se com as diferenças entre as distâncias entre dois nós consecutivos que alteram o casamento de impedância do conjunto filme/substrato com o ar e modificam os processos de perda.

De forma a isolar a influência da configuração da tela (distância entre dois nós consecutivos) na absorção apresentada pelos filmes finos, fez-se uma análise das absorções apresentadas por filmes finos de mesma espessura depositados sobre substratos distintos.

Com os dados organizados nas Tabelas 4.1 e 4.2, é possível comparar esses valores entre T1 e T2 com a mesma espessura de filme, de modo a avaliar qual a influência da distância entre dois nós consecutivos nos substratos do tipo malha utilizados no processo de atenuação da energia da onda eletromagnética incidente. A Figura 4.3 apresenta as curvas comparativas dos dados, mostrados nas Tabelas 4.1 e 4.2, entre T1 e T2, à medida que a espessura é variada.

Figura 4.3 – Curvas comparativas entre T1 e T2 em função da variação da espessura do filme de Al.

(a) frequência de máxima atenuação, (b) largura a meia altura, (c) atenuação máxima.



Fonte: Autor.

Avaliando-se os gráficos da Figura 4.3, fica claro que o substrato, ou seja, a distância entre dois nós consecutivos, influencia no processo de atenuação. Para os três gráficos, os filmes sobre T2, que possui uma distância maior entre nós, proporciona a obtenção de valores maiores para as três propriedades avaliadas em cada uma das quatro espessuras, com exceção da largura a meia altura para a espessura de 100 nm, como mostra a Figura 4.3 (b).

A diferença numérica entre T2 e T1 é mais visível com relação à atenuação máxima em função da espessura de filme, como mostrado na Figura 4.3 (c). Para T2, a atenuação máxima apresenta um padrão de decréscimo linear à medida que a espessura aumenta. Já para T1, há um leve aumento até a espessura de 75 nm, e depois um decréscimo mais acentuado quando a mesma é igual a 100 nm. Numericamente, há uma diferença média de aproximadamente 32% na atenuação máxima entre T2 e T1.

Como observado, a distância entre nós consecutivos influencia o comportamento de atenuação dos filmes finos de Al em todas as quatro espessuras. Das três propriedades avaliadas, a mais significativa, a princípio, é a atenuação máxima. O substrato T2, que possui

uma distância entre nós superior a T1, apresenta uma capacidade de atenuação superior, com uma faixa de atenuação máxima entre 75- 90%, enquanto T1 possui um faixa entre 35 – 50%.

Fica claro que a espessura do filme depositado influencia as medidas. Para a frequência de atenuação máxima de T2 com espessura de filme igual a 100nm, o seu valor foi menor comparado às demais espessuras, enquanto que para T1 não houve diferenças expressivas. E com o aumento da espessura houve uma redução na atenuação máxima para ambos os substratos. Já a largura a meia altura apresenta ligeiras variações, podendo estar relacionada a faixa de erro das medições.

Avaliando-se os resultados apresentados observa-se que, para uma mesma espessura, os filmes depositados sobre os diferentes substratos (T1 e T2) apresentam características de atenuação diferentes. Verifica-se pelo gráfico apresentado na Figura 4.3 (a) que, para uma mesma espessura, os filmes depositados sobre os substratos com maior espaçamento entre os nós promovem maior atenuação.

Este efeito pode ser explicado considerando a resistência elétrica que estas diferentes configurações impõem à passagem da corrente de Eddy formada pelos revestimentos. Assim, os filmes finos depositados sobre o substrato T2, com mesma espessura, apresentam atenuações até 40% maiores que aquelas demonstradas pelos filmes depositados sobre o substrato T1 e está diferença pode ser atribuída à configuração do substrato.

4.2 COMPARAÇÃO ENTRE FILMES DESCONTÍNUOS E CONTÍNUOS

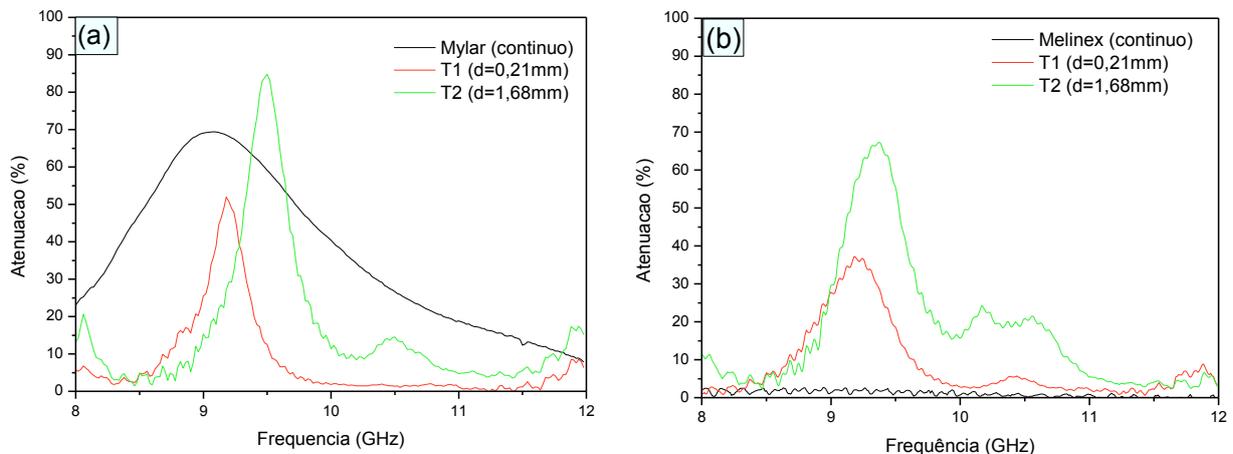
No presente trabalho buscou-se investigar a influência da utilização de substratos descontínuos no processo de atenuação da energia da onda eletromagnética incidente sobre filmes finos de Al. Como apresentado nas subseções anteriores, filmes finos de Al sobre substratos descontínuos promoveram significativa atenuação da radiação eletromagnética até valores da ordem de 90% em frequências específicas, sendo este comportamento dependente da espessura do recobrimento e da configuração do substrato.

De modo a avaliar a influência da descontinuidade promovida por T1 e T2, fez-se um estudo comparativo dos filmes sobre T1 e T2 com filmes depositados em dois substratos poliméricos contínuos, comercialmente conhecidos como Mylar® e Melinex®, fornecidos pela empresa Dupont.

As curvas de atenuação para os filmes sobre o Mylar® e o Melinex® foram obtidas da tese de doutorado da orientadora do presente trabalho. Ambos os substratos se diferem pela espessura, sendo 1,0 mm para o Mylar® e 0,1 mm para o Melinex®. A espessura do filme de

Al depositado sobre o Mylar® apresenta 65 nm. Este conjunto filme/substrato foi comparado com os filmes com espessuras de 62,5 nm depositados sobre os substratos T1 e T2, como apresentado na Figura 4.4 (a). Já o filme de Al depositado sobre o substrato Melinex® possui 100 nm de espessura, e foi comparado com os filmes de 100 nm depositados sobre T1 e T2, como apresentado na Figura 4.4 (b).

Figura 4.4 – Curvas de atenuação comparativas entre filmes de Al contínuo e descontínuo. (a) filme sobre Mylar®; (b) filme sobre Melinex®.



Fonte: Autor e adaptado de Soethe (2009).

Na Figura 4.4 (a), observa-se que o filme depositado sobre T2 teve o maior pico de atenuação em 84,8% na frequência de 9,50 GHz. O filme sobre Mylar® teve o segundo maior pico com um valor de 69,4% na frequência de 9 GHz, enquanto que o filme sobre T1 proporcionou um pico de atenuação igual a 51,9% na frequência de 9,18 GHz.

Além dos valores de pico, nota-se que o comportamento da curva em toda a faixa de frequências é diferente para os filmes descontínuos e o filme contínuo. O Mylar® apresenta uma característica de atenuação em uma banda de frequências mais larga, em comparação às bandas para T1 e T2. E também, em nenhuma frequência o Mylar® tem uma porcentagem de atenuação próxima a zero, sendo o seu mínimo superior a 10% na frequência de 12GHz.

A avaliação das curvas apresentadas na Figura 4.4 (a) sugere, inicialmente, que filmes descontínuos podem proporcionar uma maior atenuação, mas em contrapartida o processo de atenuação ocorre para frequências específicas. Além disso, há um limite para a distância entre nós para os substratos descontínuos, de modo que a capacidade de atenuação seja favorecida.

Isso pode ser afirmado pelo fato de o pico de atenuação para o filme contínuo ter um valor intermediário entre T2 e T1, onde T2 tem o maior pico e T1 o menor.

De forma geral, observando-se os resultados apresentados na Figura 4.4(a) verifica-se que a configuração do substrato influi diretamente na atenuação por ele apresentada, atuando como um agente que potencializa ou desfavorece o casamento de impedâncias entre o ar e o conjunto filme/substrato.

Cabe ressaltar que, os filmes apresentados na Figura 4.4(a) possuem espessuras da ordem de 65 nm, que como visto anteriormente apresentam intrinsicamente mecanismos de perda relacionados com a formação de correntes de Eddy, em função da espessura. A associação de ambos os mecanismos: configuração do substrato e espessura do recobrimento metálico atuam de forma paralela, proporcionando diferentes padrões de absorção.

Por outro lado o filme depositado sobre o substrato Melinex® não apresenta atenuação considerável, tendo valores de pico abaixo de 5%, como é possível observar na Figura 4.4 (b). Portanto, pode-se afirmar que o filme de 100 nm sobre Melinex® é praticamente transparente para a onda eletromagnética incidente.

Observando-se os filmes depositados com mesma espessura sobre os substratos descontínuos T1 e T2 pode-se verificar uma grande alteração de comportamento da absorção em função da frequência. Neste caso fica evidente que a absorção deve-se principalmente à configuração do substrato, que proporciona um maior ajuste de impedâncias do conjunto filme/substrato com o ar, atuando como um seletor de frequências (GOVINDASWAMY et al., 2004).

Pode-se verificar, desta forma, que filmes contínuos com maior espessura atuam como condutores elétricos, tendo o mesmo comportamento de qualquer material metálico, quando exposto à radiação eletromagnética na faixa de frequências de micro-ondas, ou seja, refletem a radiação eletromagnética incidente sobre eles.

Desta forma, a modificação da configuração do substrato promove a formação de uma estrutura descontínua, que possibilita que mecanismos de perda sejam observados. Neste caso, a distância entre dois nós consecutivos altera a frequência na qual este material irá promover os processos de cancelamento de fases das ondas incidente e refletida.

5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÃO

Neste trabalho de conclusão de curso foi realizada uma avaliação da influência da inserção de descontinuidades em filmes finos de Al, no processo de atenuação da energia da onda eletromagnética incidente em uma faixa de frequências de micro-ondas, por meio da utilização de substratos com diferentes configurações geométricas do tipo malha, com distâncias entre dois nós consecutivos distintas.

Para isso, foram obtidos filmes finos de Al com quatro diferentes espessuras pela técnica de PVD, conhecida como magnetron sputtering, sobre dois substratos descontínuos diferentes denominados T1 e T2, onde a distância entre nós para T2 é superior a T1. Já a caracterização eletromagnética foi realizada por meio da técnica de guia de ondas, com a inserção de uma placa metálica 100% refletora, para uma faixa de frequências de 8 a 12 GHz.

Primeiramente, investigou-se a capacidade de atenuação dos filmes descontínuos para diferentes espessuras. Verificou-se, que tanto T1 quanto T2 proporcionam um nível de atenuação da radiação incidente significativo, estando em torno de 35% - 55% para T1 e 65% - 90% para T2. Além disso, observa-se para ambos os substratos, que os comportamentos das curvas apresentam atenuação em uma faixa de frequências estreita, caracterizando esses filmes com o comportamento de um MARE do tipo banda estreita.

Na sequência, avaliou-se com mais detalhes as curvas obtidas na caracterização eletromagnética com relação à frequência de máxima atenuação, a largura a meia altura e a atenuação máxima para cada espessura de filme e tipo de substrato. Observou-se que, o substrato T2 apresenta valores superiores nesses três parâmetros analisados para praticamente todas as espessuras, com relação ao substrato T1, o qual possui uma distância entre dois nós consecutivos menor que T2.

Avaliando-se os resultados pode-se afirmar que uma distância maior entre nós favorece uma ampliação no processo de atenuação, uma vez que esta variação na distância altera a resistência elétrica do substrato e amplia os processos de perda por cancelamento de fases das ondas incidente e refletida.

Entretanto, nota-se que com o aumento da espessura de filme, para ambos os substratos, há uma redução no valor de atenuação máxima. Isso sugere que há um limite para a espessura do filme metálico, no qual a atenuação da radiação seja a máxima possível para um determinado substrato.

Os resultados permitem ainda concluir que a configuração do substrato utilizado altera a faixa de frequências na qual a atenuação é mais pronunciada. Pode-se concluir que filmes de mesma espessura e mesmo material, depositados sobre substratos com características distintas, favorecem mecanismos de cancelamento de fases das ondas incidente e refletidas. Este efeito ocorre principalmente porque, para algumas distâncias entre dois nós consecutivos, um perfeito casamento de impedâncias entre o ar e o conjunto filme/substrato é verificado.

A associação do controle da espessura e da utilização de um substrato descontínuo permite que atenuações de até 90% sejam obtidas para os conjuntos filme/substratos estudados. Este resultado é o apresentado pelos filmes finos de alumínio com espessuras da ordem de 50 nm e depositados sobre substrato classificado como T2.

Ao fazer uma comparação entre os filmes descontínuos e contínuos depositados sobre dois substratos com espessuras diferentes e sem discontinuidades, verificou-se uma significativa alteração do comportamento do conjunto filme/substrato quanto aos processos de atenuação, se comparados com os resultados obtidos para os substratos descontínuos.

Considerando-se filmes com espessuras menores fica evidente que o processo de atenuação é dependente da espessura do recobrimento e que a configuração do substrato altera significativamente a absorção apresentada pelo conjunto.

Para os filmes mais espessos, da ordem de 100 nm, verifica-se que a ausência de discontinuidades no substrato promove uma redução significativa da atenuação apresentada pelo conjunto. Entretanto, para esta mesma espessura, quanto maior a distância entre dois nós consecutivos, maior a absorção apresentada. Este efeito pode ser atribuído, neste caso, aos mecanismos de perda promovidos pela configuração do substrato.

Com todos os resultados e avaliações realizadas no presente trabalho é possível afirmar que a inserção de discontinuidades em filmes finos metálicos por meio do uso de substratos do tipo malha influencia positivamente o processo de atenuação pelos filmes finos de alumínio.

Entretanto, faz-se necessário a realização de estudos mais aprofundados para que esses processos sejam melhores compreendidos, até que seja viável a sua aplicação de forma eficiente como tecnologia furtiva em aeronaves. Todavia, pode-se concluir que há um grande potencial tecnológico para aplicação dos filmes finos descontínuos estudados no presente trabalho como MARE, no setor aeroespacial e nos demais setores, tanto militar como civil.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No presente trabalho, os resultados alcançados são preliminares, apesar de reforçarem conceitos e proporcionarem uma nova percepção relacionada à capacidade de atenuação por filmes finos metálicos. Portanto, é necessário que um estudo mais amplo e aprofundado seja realizado, de modo a compreender em sua totalidade os fenômenos físicos envolvidos no processo de atenuação da radiação eletromagnética por filmes finos metálicos.

Assim, podem-se sugerir como temas de trabalhos futuros os seguintes tópicos:

- Realizar estudos com uma gama maior de substratos descontínuos, com diferentes padrões geométricos, espessuras e composições;
- Estudar com mais profundidade os mecanismos físicos que regem o caráter absorvedor de filmes finos metálicos descontínuos;
- Obter e avaliar filmes finos descontínuos compostos por outros materiais, por exemplo, titânio, cobre, ligas metálicas em geral, entre outros;
- Estudar a influência da técnica de deposição de filmes finos metálicos nas suas propriedades absorvedores;
- Caracterizar os filmes finos pelo uso de diferentes técnicas, seja para a obtenção de propriedades como espessura, composição química, elétrica, magnética, entre outras, ou de absorção via arco NRL, câmara anecóica, etc;
- Associar filmes finos metálicos com materiais estruturais, formando materiais compósitos viáveis, técnica e financeiramente, na aplicação em aeronaves furtivas;

REFERÊNCIAS

BARBOSA, Francisco Matheus Santiago. HORTEN HO 229: AVIÃO ALEMÃO QUE PODERIA TER MUDADO A SEGUNDA GUERRA. Disponível em: <<http://www.pontotechno.com.br/2013/06/horten-ho-229.html>>. Acesso em: 24 jun. 2014.

BOGAERTS, Annemie et al. Gas discharge plasmas and their applications. *Spectrochimica Acta Part B*, v. 57, n. 4, p.609-658, 5 abr. 2002.

BOSMAN, H.L.; LAU, Yue Ying; GILGENBACH, R.M.. Power absorption by thin films on microwave windows. **Ieee Transactions On Plasma Sciences**, Santa Fe, v. 32, n. 3, p.1292-1297, jun. 2004.

Brandt Innovative Technologies, Inc.. **Apparatuses, systems, and methods for electromagnetic protection**. EUA nº WO 2012/047734 A2, 29 set. 2011, 12 abr. 2012.

CADIRCI, Serdar. **RF Stealth (Or Low Observable) and Counter- RF Stealth Technologies: Implications of Counter- RF Stealth Solutions for Turkish Air Force**. 161 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência em Sistemas de Guerra, Naval Postgraduate School, Monterey, 2009.

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Materiais Avançados: 2010-2022**. Brasília: Cgee, 2010.

CHAPMANN, B. *Glow Discharge Processes: Sputtering and plasma etching*. New York: John Wiley & Sons, 1980.

DIAS, Josiane de Castro et al. Absorvedores de radiação eletromagnética aplicados no setor aeronáutico. *Revista de Ciência & Tecnologia*, Piracicaba, n. 15, p.33-42, jun. 2000.

FILHO, Sebastião Eleutério. **Magnetron sputtering planar construção e aplicação**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1991.

FUJIEDA, Tadashi et al. **Electromagnetic wave absorption material and an associated device**. EUA nº US7239261 B2, 9 ago. 2004, 3 jul. 2007.

GLOBAL SECURITY. **Senior crown SR-71**. Disponível em: <<http://www.globalsecurity.org/intell/systems/sr-71.htm>>. Acesso em: 04 jul. 2014.

GOVINDASWAMY, Srikanth et al. Frequency-selective surface based bandpass filters in the near-infrared region. **Microwave And Optical Technology Letters**, Malden, v. 41, n. 4, p.266-269, 20 maio 2004.

INTERNATIONAL ENCYCLOPEDIA OF COMPOSITES. v.6. New York: VHC Publishers, 1991.

KAISER, Kenneth L.. **Eletromagnetic compatibility handbook**. Boca Raton: Crc Press, 2005.

KNOTT, Eugene F.; SHAEFFER, John F.; TULEY, Michael T.. **Radar cross section**. 2. ed. Raleigh: Scitech Publishing, 2004.

KONUMA, Mitsuharu (Ed.). **Springer series on Atoms+Plasmas: Film deposition by plasma techniques**. v. 10. Berlin: Springer, 1992.

MILITARY-TODAY. **Lockheed F-117 Nighthawk: Stealthy ground attack aircraft**. Disponível em: <http://www.military-today.com/aircraft/lockheed_f117_nighthawk.htm>. Acesso em: 25 jun. 2014.

NEUGEBAUGER, C.A. Condensation, Nucleation and of thin Films. In: MAISSEL, Leon I.; GLANG, Reinhard (Ed.). **Handbook of thin film technology**. McGraw Hill, 1970.

OHRING, Milton. **The materials science of thin films**. San Diego: Academic Press, 1992.

PEREIRA, José Jesus. **Caracterização eletromagnética de materiais absorvedores de microondas via medidas de permissividade e permeabilidade complexas na banda X**. 201 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, Taubaté, 2007.

PODER AÉREO. **Northrop vai consertar a traseira dos B-2**. Disponível em: <<http://www.aereo.jor.br/2010/03/04/northrop-vai-consertar-a-traseira-dos-b-2/>>. Acesso em: 04 jul. 2014.

QUADROS, Hugo Borges de et al. Qualitative analysis of induction process of anisotropic structures in titanium thin films. **Sae Technical Paper Series**. São Paulo. out. 2013.

TAKIZAWA, Koji; HASHIMOTO, O.. Transparent Wave Absorber Using Resistive Thin Film at V-Band Frequency. **Ieee Transactions On Microwave Theory And Techniques**, Gainesville, v. 47, n. 7, p.1137-1141, jul. 1999.

SIMÕES, Roberto; NOHARA, Evandro Luís; REZENDE, Mirabel Cerqueira. Materiais absorvedores de radiação eletromagnética baseados em ferrita MnZn. **Revista Ciências Exatas**, Taubaté, v. 12, n. 1, p.121-124, set. 2006.

SOETHE, Viviane Lilian. **Deposição de Filmes Metálicos Sobre Poli(Tereftalato de Etileno) Via Trido-Magnetron-Sputtering: Influência da Corrente e da Voltagem nas Propriedades do Filmes**. 2004. 676767 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2004.

SOETHE, Viviane Lilian et al. Influência da espessura de filmes finos de alumínio na atenuação da energia da onda eletromagnética na faixa de microondas (8 - 12 GHz). **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, [s.l], v. 27, n. 2, p.63-67, jun. 2008.

SOETHE, Viviane Lilian. **Filmes finos absorvedores de microondas obtidos pelo processo de deposição física em fase vapor**. Tese (Doutorado) - Curso de Física, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2009.

STEALTH FIGHTER ASSOCIATION. **F-117 History**. Disponível em: <http://www.f117sfa.org/f117_history.htm>. Acesso em: 24 jun. 2014.

THERMAL CONDUCTIVE BONDING INC. What is sputtering? Disponível em: <<http://www.tcbonding.com/sputtering.html>>. Acesso em: 11 jun.2014.

UFINTSEV, P. Ya.. **Method of edge waves in the physical theory of diffraction**. Springfield: Foreign Technology Division, 1962.

ZIKIDIS, Konstantinos; SKONDRAS, Alexios; TOKAS, Charisios. Low Observable Principles, Stealth Aircraft and Anti-Stealth Technologies. *Journal Of Computations & Modelling*. London,p.129-165.2014.