

Simulações da Seção Reta Radar de uma Aeronave com e sem a Aplicação de Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética

Mauro A. Alves, Luiz A. Andrade e Mirabel C. Rezende
Instituto de Aeronáutica e Espaço, Divisão de Materiais, São José dos Campos, SP, Brasil

Resumo — Neste trabalho, simulações da seção reta radar (RCS) de um modelo CAD de uma aeronave são apresentadas. Estas simulações, realizadas através do programa *CADRCS*, mostram o comportamento da RCS da aeronave em função da refletividade de sua superfície para uma onda de radar incidente com frequência de 10 GHz. Os resultados de várias simulações, onde foram utilizados diferentes valores de refletividade da superfície, foram comparados e sugerem possíveis estratégias para a futura aplicação de materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE) em aeronaves reais para a redução da RCS.

Palavras-chaves — Seção Reta Radar, Aeronaves, Modelo CAD, Simulação.

I. INTRODUÇÃO

A seção reta radar (RCS) é a medida da capacidade de um alvo espalhador de refletir sinais de radar na direção do emissor de ondas de radar. A RCS é definida como 4π vezes a razão entre a potência de espalhamento em uma direção em relação à potência por unidade de área de uma onda plana incidente sobre o espalhador em uma direção quando a distância entre o espalhador e o emissor tende ao infinito. Para um objeto tridimensional a RCS pode ser expressa em função da densidade de potência S , do campo magnético H ou do campo elétrico E . A RCS expressa em função do campo elétrico é [1]-[2]:

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|E^E|^2}{|E^I|^2} \quad (1)$$

onde r é a distância entre o alvo e o ponto de observação, E^E e E^I são os valores dos campos elétricos incidente e espalhado. Equação (1) é válida quando o alvo é iluminado por uma onda plana, ou seja, quando o alvo está localizado no campo distante do emissor, i.e., quando $r \geq 2D^2/\lambda$, onde D é a maior dimensão do alvo [2]. Usualmente, devido a grande variação dos valores de RCS para um mesmo objeto, uma escala de potência logarítmica é usada com referência ao valor de $\sigma_{ref} = 1 \text{ m}^2$:

$$\sigma_{dBsm} = 10 \log_{10} \left(\frac{\sigma_{m^2}}{\sigma_{ref}} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{\sigma_{m^2}}{1} \right) \quad (2)$$

M. A. Alves, malves@iae.cta.br, Tel. +55-12-39476471, L. A. Andrade, andrade@iae.cta.br, M. C. Rezende, mirabel@iae.cta.br, Este trabalho foi parcialmente financiado pela FINEP, através do Projeto MARE.

É importante salientar que a RCS definida por (1) possui uma forma enganosamente simples. O cálculo de campos espalhados por um alvo pode ser uma tarefa de difícil tratamento matemático exigindo a solução das equações de Maxwell sob condições de contorno complicadas. Soluções analíticas de (1) existem apenas para objetos com geometrias simples. Devido às dificuldades associadas ao cálculo da RCS de objetos com geometrias complexas, torna-se necessário a aplicação de métodos numéricos para a computação da RCS. Existem no mercado vários programas comerciais sofisticados que empregam métodos numéricos para a simulação da RCS de alvos complexos. Neste trabalho, são apresentados os resultados de simulações da RCS de uma aeronave obtidos através do programa comercial *CADRCS* [3] para as situações nas quais a superfície de uma aeronave encontra-se com ou sem a aplicação de material absorvedor de radiação eletromagnética (MARE).

II. PROGRAMA DE SIMULAÇÃO CADRCS

CADRCS, assim com outros programas de simulação de espalhamento de ondas eletromagnéticas, usa técnicas de traçado de raios combinadas à física óptica para o cálculo da RCS de um objeto. *CADRCS* também considera o somreamento de raios o que torna os cálculos bastante precisos para objetos maiores que o comprimento de onda do radar [4]. Detalhes a respeito da teoria e métodos utilizados por este programa são considerados como material classificado por seus autores e, portanto, não estão disponíveis aos seus usuários. *CADRCS* é um programa versátil; com ele é possível simular a RCS de um objeto em várias situações diferentes, como por exemplo, variando-se a distância entre o alvo e o radar, atribuindo-se diferentes valores de refletividade à superfície do alvo, utilizando-se diferentes polarizações da onda de radar, etc. Um computador PC Pentium 4 3.2 GHz com 3.0 GB de memória RAM foi utilizado nas simulações. Com um computador como este as simulações da RCS de objetos com geometria simples são obtidos em algumas horas, por outro lado, os cálculos da RCS de objetos complexos representados por modelos CAD bem detalhados requerem vários dias de tempo de computador.

Para este estudo foi escolhida a aeronave de combate F-5 para a qual existia um modelo CAD disponível. Através do programa *Rhinoceros* a superfície do modelo CAD foi subdividida em mais de 21000 elementos triangulares por um

gerador automático de malhas. Esta malha foi então importada ao programa *CADRCs* para a realização das simulações. A representação em CAD desta aeronave é mostrada na Fig. 1.

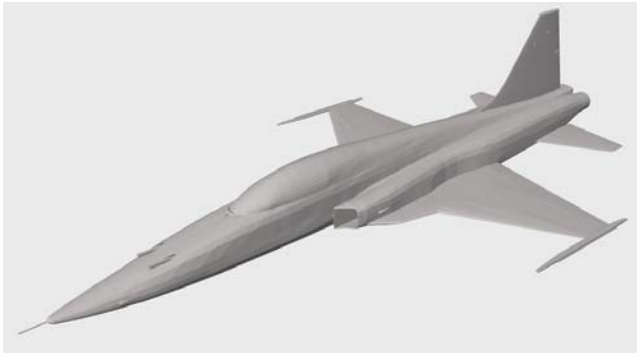


Fig.1. Representação CAD do modelo da aeronave F-5 utilizado nas simulações com o programa *CADRCs*.

III. SIMULAÇÕES

Foram realizadas simulações nas quais a superfície da aeronave era constituída por um material que reflete totalmente as ondas de radar, e também nas quais a superfície encontrava-se total ou parcialmente recoberta por MARE. Para simular a presença de MAREs com *CADRCs* foram atribuídos valores de refletividade menores do que 1 a uma superfície, ou à parte dela. Por exemplo, para se simular um material com um índice de absorção de 20 dB utiliza-se um valor de refletividade igual a 0.01. Em todas as simulações aqui apresentadas foram utilizadas ondas de radar com frequência de 10 GHz e polarização vertical, com o alvo localizado a uma distância que satisfazia a condição de campo distante. Os valores de RCS foram obtidos para a aeronave girando ao redor de um eixo de rotação perpendicular ao plano horizontal, a intervalos de $0,5^\circ$.

Através do *CADRCs*, é possível identificar na superfície da aeronave as regiões mais ou menos refletoras às ondas de radar, assim como obter o valor da RCS total da aeronave para diferentes valores de ângulo de aspecto. Na Fig. 2 são mostradas as vistas frontal, traseira e lateral de uma aeronave composta por uma superfície totalmente refletora iluminada por ondas de radar. Nesta figura, áreas de alta refletividade são mostradas em vermelho, áreas de baixa refletividade em verde, e as áreas em cinza não refletem as ondas eletromagnéticas na direção do radar. Como esperado, as cavidades presentes na aeronave, tais como as entradas e saídas das turbinas, e as superfícies laterais são grandes contribuidoras para a RCS total do alvo. É interessante observar que quando a aeronave é iluminada frontalmente pelas ondas de radar o canopi, o radome e os bordos de ataque das asas contribuem pouco para a RCS total. Na Fig. 3 são comparados os valores de RCS desta aeronave calculados quando a sua superfície é totalmente refletora às ondas de radar e quando ela é totalmente composta por materiais com índices de refletividade iguais a 0,1, 0,01 e 0,001 os quais

correspondem às absorções de 10, 20 e 30 dB, respectivamente.

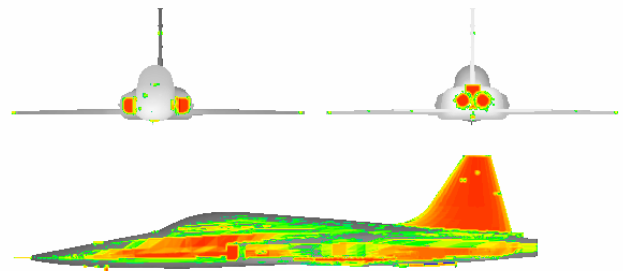


Fig. 2. Simulação da RCS a 10 GHz da aeronave F-5. Áreas de alta refletividade estão indicadas em vermelho. Áreas de baixa refletividade estão indicadas em verde. Áreas em cinza não refletem ondas de radar. Para a obtenção desses resultados, considerou-se toda a superfície da aeronave como sendo metálica (100% de refletividade).

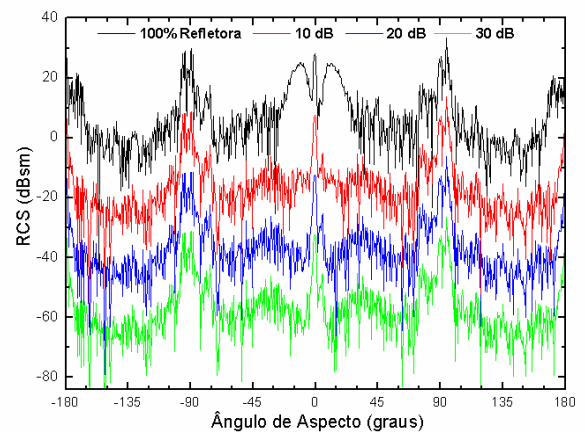


Fig. 3 RCS da aeronave F-5 em função do ângulo de aspecto e da absorção de sua superfície a ondas de radar com frequência de 10 GHz. Os ângulos de aspecto de 0° , -90° e 90° , e -180° e 180° correspondem às visões frontal, laterais e traseira da aeronave, respectivamente.

Na figura acima, pode-se observar alguns aspectos interessantes tais como a presença dos lobos de reflexão produzidos pelas entradas de ar das turbinas, localizados aproximadamente em -15° , 0° e 15° , a alta refletividade das laterais da aeronave indicada pelos altos valores de RCS a -90° e 90° , e os lobos de reflexão das saídas de ar das turbinas localizados a -180° e 180° . Nota-se também que ocorre uma redução significativa da RCS da aeronave, da ordem de 20 dBsm quando sua superfície é totalmente composta por um material com um índice de absorção de “apenas” 10 dB.

Na impossibilidade de recobrir completamente a superfície da aeronave com MARE, resultados como os mostrados pelas Figs. 2 e 3 indicam quais as áreas da superfície da aeronave que são as maiores contribuidoras para a RCS total e que, portanto, deveriam receber preferencialmente a cobertura de MARE. Na Fig. 4 é mostrado o modelo em CAD da aeronave F-5 no qual apenas algumas áreas, indicadas pela cor azul, possuem refletividade de 0,001 (absorção de 30 dB); o restante da aeronave, em cinza, reflete completamente as ondas de radar. As áreas de aplicação de MARE escolhidas foram o radome, o interior das entradas e saídas de ar das

turbinas, os bordos de ataque das asas, e os estabilizadores da cauda.

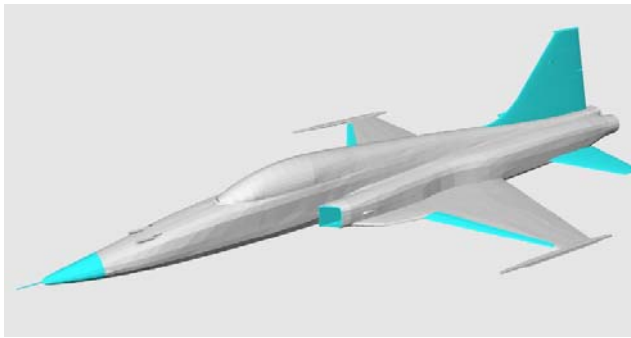


Fig.4. Representação CAD do modelo da aeronave utilizado nas simulações com áreas de diferentes valores de refletividade. As áreas em cinza são 100% refletoras ao radar e as áreas em azul possuem índice de refletividade de 0,001 (absorção de 30 dB). As saídas de ar das turbinas, não exibidas na figura, também possuem índice de refletividade de 0,001.

Na Fig. 5 são comparados os valores de RCS simulados para uma aeronave com uma superfície completamente refletora (ver Fig. 3) com o modelo mostrado na Fig. 4.

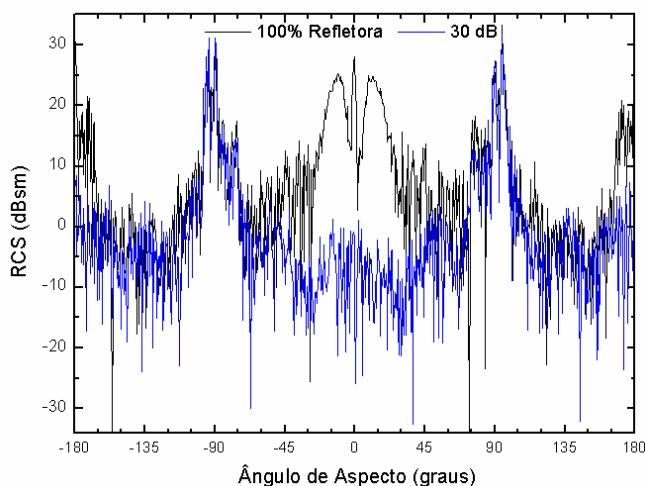


Fig. 5 Comparação da RCS de diferentes modelos da aeronave F-5 (ver Figs.1, 3 e 4) para ondas de radar com frequência de 10 GHz. Os ângulos de aspecto de 0°, -90° e 90°, e -180° e 180° correspondem às visões frontal, laterais e traseira da aeronave, respectivamente.

Através dos resultados mostrados na Fig. 5 conclui-se que a aplicação de MARE às entradas de ar atenua de maneira significativa a RCS frontal da aeronave, o que pode indicar que as cavidades das entradas de ar das turbinas são as principais responsáveis pela RCS da aeronave para este ângulo de aspecto; a comparação dos resultados das simulações para ângulos de aspecto entre -30° e 30° mostra que houve uma redução da ordem de 30 dBsm na RCS. Pode-se dizer que as cavidades das saídas de ar das turbinas também contribuem de forma importante para a RCS total da aeronave; a aplicação de MARE no interior dessas cavidades provocou uma queda no valor da RCS de cerca de 20 dBsm para ângulos de aspectos próximos a -180° e 180° . A aplicação de MARE ao estabilizador vertical da aeronave também resultou em uma redução importante na RCS da aeronave ao redor de 90° e -90° . O fato da escala de RCS ser

logarítmica mascara, em parte, os resultados obtidos pelas simulações. No entanto, nota-se que quando a aeronave é iluminada lateralmente pela onda de radar, além do estabilizador vertical, a fuselagem lateral da aeronave também contribui para a RCS total. A importância dos bordos de ataques das asas é evidenciada em parte pela redução na RCS que ocorreu para os ângulos de aspecto entre -60° e -30° e entre 30° e 60° .

Para uma estimativa da contribuição de parte da fuselagem lateral da aeronave foi utilizado o modelo da aeronave mostrado na Fig.6. Neste caso, as partes indicadas em azul nesta figura também possuem índice de refletividade de 0,001 (absorção de 30 dB).

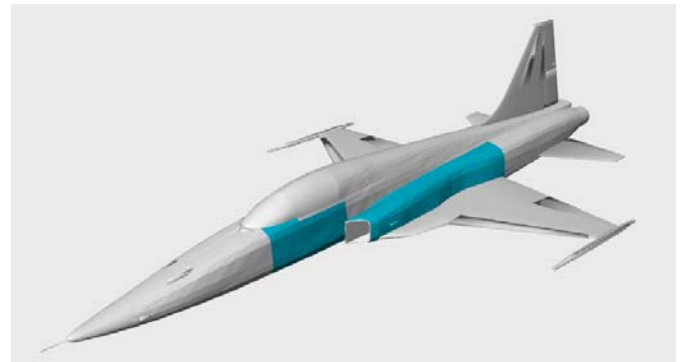


Fig.6. Representação CAD do modelo da aeronave utilizado nas simulações com áreas de diferentes valores de refletividade. As áreas em cinza são 100% refletoras ao radar e as áreas em azul possuem índice de refletividade de 0,001 (absorção de 30 dB)

Os resultados da simulação para o modelo da Fig. 6 estão mostrados na Fig. 7. A comparação de resultados não é tão dramática quanto a que é mostrada na Fig. 5.

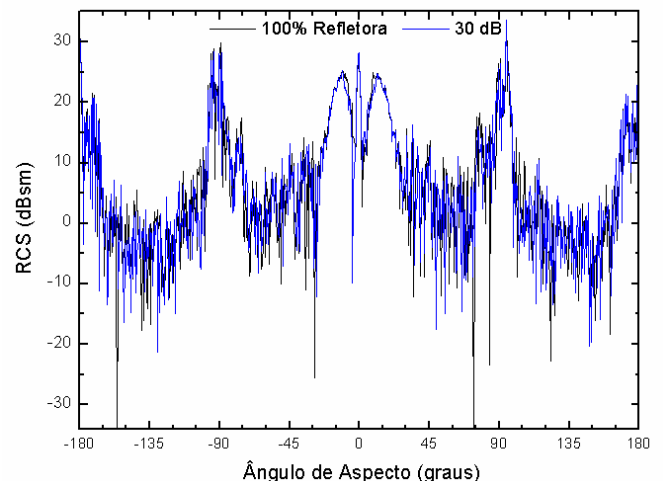


Fig. 7 Comparação da RCS de diferentes modelos da aeronave F-5 (ver Figs.1, 3 e 6) para ondas de radar com frequência de 10 GHz. Os ângulos de aspecto de 0°, -90° e 90°, e -180° e 180° correspondem às visões frontal, laterais e traseira da aeronave, respectivamente.

Isto se deve ao fato da RCS da lateral da aeronave ser a soma da contribuição da RCS de várias partes da fuselagem, diferente do que ocorre com as cavidades que são os contribuidores majoritários para a RCS quando a aeronave é iluminada de frente. Ainda assim, a aplicação de MARE a

estas áreas produziu uma redução mensurável da RCS da aeronave para alguns valores de ângulo de aspecto.

IV. CONCLUSÃO

Programas que permitem a simulação da RCS de aeronaves ou qualquer outro tipo de plataforma em diferentes situações são ferramentas de extrema importância, pois eles possibilitam uma melhor compreensão dos problemas relacionados à redução da RCS desta aeronave para torná-la mais furtiva, e são fundamentais, por exemplo, em projetos de aplicação de MARE em aeronaves já existentes ou na construção de aeronaves furtivas. Existem muitas circunstâncias nas quais não é possível a medição da RCS de objetos reais como o alto custo, o fato destes objetos ainda estarem sendo desenvolvidos ou porque os materiais com os quais eles serão construídos ainda estarem em fase de desenvolvimento. Nessas situações, é essencial a simulação da RCS através de meios computacionais, pois através dela é possível prever com um bom grau de confiabilidade e baixo custo o comportamento da RCS de praticamente qualquer plataforma de interesse.

REFERÊNCIAS

- [1] "IEEE Standard Definitions for Terms for Antennas," *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. AP-37, pp.956-966, June 1989.
- [2] E. F. Knott; J. F. Schaeffer and M.T. Tuley; "Radar Cross Section", 2ª edição, Artech House Inc., USA, 1993
- [3] G. A. Lindqvist. CADRCS Simulation Tool. CSS, Copenhagen, Denmark
- [4] H. Essen, S. Boehmsdorff, G. Briegel e A. Wahlen, "On the Scattering Mechanism of Power Lines at Millimeter-Waves", *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, no. 9, pp1895-1903, September 2002.