



Avaliação da redução de seção reta radar de superfície metálica irradiada na banda X pelo emprego de materiais absorvedores de radiação eletromagnética

Radar cross-section reduction evaluation effect by the use of Radar Absorbing Materials(RAM) coating in a metal surface radiated by an X band source

Ana Paula Santiago de Falco¹ , Ali Kamel Issmael Junior¹ , Marcelo da Silva Matias² , André Paim Gonçalves^{1,3} , Roberto da Costa Lima¹ , Priscila Richa Ribeiro Ferreira¹ , Elvia Leal⁴ , Ana Cristina Figueiredo de Melo Costa⁴ 

1. Instituto de Pesquisas da Marinha – Departamento de Materiais – Rio de Janeiro/RJ – Brasil.
2. Centro de Guerra Acústica e Eletrônica da Marinha – Departamento de Capacitação – Rio de Janeiro/RJ – Brasil.
3. Instituto Tecnológico de Aeronáutica – Laboratório de Guerra Eletrônica – São José dos Campos/SP – Brasil.
4. Universidade Federal de Campina Grande – Departamento de Materiais – Campina Grande/PB – Brasil.

Autor correspondente: marcelomatias610@gmail.com

Editor de seção: Álvaro Damião

Recebido: Abr. 18, 2022 **Aceito:** Out 13, 2022

RESUMO

Objetivo: O objetivo deste artigo é apresentar os resultados das medidas de redução de seção transversal do radar (SR) de materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MAREs) realizadas pelo método da perda de inserção em ambiente laboratorial semianecoico na banda X (de 8,2 a 12,4 GHz) e subsidiar a continuidade da atividade pela realização da avaliação operacional desses itens em ambiente operacional.

Métodos: O método empregado permitiu a obtenção de valores de potência refletida de até -42 dBm para as amostras medidas. **Resultados:** Os resultados obtidos foram considerados satisfatórios. **Conclusão:** Os resultados obtidos permitem concluir a validade da hipótese de que todos os MAREs fabricados contribuem para a redução da STR de meios navais constituídos por estruturas metálicas na banda X.

PALAVRAS-CHAVE: RCS, STR, MARE, Furtividade.

ABSTRACT

Objective: The main objective of this article is to present the results of the radar cross section (RCS) reduction measurements of radar absorbing materials (RAMs) carried out by the insertion loss method in a semianechoic laboratory environment, in the X band (of 8.2 at 12.4 GHz) and subsidize the continuity of the activity by carrying out the operational assessment of these items in an operational environment. The laboratory tests carried out aim to seek subsidies to refute or confirm the following hypothesis: The MARE constructed contribute to the reduction of the RCS of naval means constituted by metallic structures.

Method: The method employed allowed obtaining reflected power values of up to -42 dBm for the measured samples. **Results:** The results obtained were considered satisfactory. **Conclusion:** The results obtained allow concluding the validity of the hypothesis that all manufactured MAREs contribute to the reduction of the STR of naval assets made up of metallic structures in the X band.

KEYWORDS: RCS, STR, MARE, Furtivity.

INTRODUÇÃO

A redução de SSR é um importante recurso tecnológico furtivo para aeronaves, mísseis, navios e outros veículos militares. Com valores menores de SSR, os veículos podem ter maior probabilidade de evitar a detecção por radar, seja de instalações terrestres, armas guiadas ou outros veículos. A concepção da assinatura reduzida também melhora a capacidade de sobrevivência global das plataformas através da melhoria da eficácia das suas contramedidas de radar¹.

Com o intuito de proteger as plataformas navais, as placas elastoméricas de materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MAREs) tem a perspectiva de utilização como revestimento de meios operativos pela Marinha do Brasil, de forma a aumentar a furtividade desses meios contra detecção por radar, implementando a redução da seção transversal do radar (STR ou RCS, sigla em inglês para *radar cross section*).

Tais placas empregam o conceito de revestimentos finos feitos apenas de dielétricos e condutores com uma largura de banda de absorção estreita em torno da ressonância. A avaliação dessas placas se tornou necessária e, para isso, foi desenvolvida uma metodologia com duas fases. A primeira se trata de efetuar testes em ambiente controlado, onde um *setup* de medidas de STR empregando câmara semianecoica e alvos metálicos em escala reduzida com e sem o revestimento de MARE. A segunda foi realizada em ambiente operacional em mar aberto sem interferência de terra e outros meios. Tal fase empregou meios navais para a realização de corridas de teste explorando diversos ângulos de incidência e o efeito de multicaminho (*multipath*) da onda de radiofrequência (RF). Com isso, a variação do alcance de detecção de radar de um alvo com e sem revestimento de MARE, irradiado por radar construído na faixa de frequência de ressonância do MARE fabricado, foi verificado.

O objetivo deste artigo é apresentar os resultados das medidas de redução de STR de MARE realizadas pelo método da perda de inserção em ambiente laboratorial semianecoico, na banda X (de 8,2 a 12,4 GHz) e subsidiar a continuidade da atividade pela realização da avaliação operacional desses itens em ambiente operacional. Os testes laboratoriais realizados visam buscar subsídios para refutar ou confirmar a seguinte hipótese: Os MAREs construídos contribuem para a redução da STR de meios navais constituídos por estruturas metálicas.

METODOLOGIA

A primeira fase foi conduzida em ambiente controlado visando obter quantitativamente os valores de redução de STR obtida pelo emprego do MARE como revestimento em alvos metálicos disponíveis em geometrias planas. Foram avaliadas seis amostras que, por serem de uso militar naval, possuem grau sigilo, e foram identificadas no artigo com letras em sequência. Mediante os dados de caracterização dielétrica e do levantamento da absorvância dessas placas, obteve-se que elas se constituem de MAREs ressonantes em faixa estreita, concebidas para atenuar a irradiação em ângulo de incidência normal, na faixa de frequência de 8,2 a 12,4 GHz (banda X).

Em função da facilidade logística e da economicidade, optou-se por seguir inicialmente a fase I em ambiente controlado, cujos resultados podem justificar a execução da fase II, em ambiente operacional controlado, futuramente.

Os testes foram realizados no Laboratório de Guerra Eletrônica (LabGE) do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), por dispor de todos os equipamentos para a realização de medidas por perdas de inserção empregando câmara semianecoica.

Para a realização da verificação da redução de STR por meio da medida da potência refletida, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Câmara semianecoica;
- Suporte de alvo cilíndrico, revestido de material absorvedor, com base rotativa;
- Analisador de espectro Keysight Modelo E4407B (de 9 kHz a 26,5 GHz) como gerador de sinal de RF;
- Gerador de sinais vetorial Keysight modelo E8257D PSG (de 250 kHz a 20 GHz) como medidor de recepção de sinal de RF;
- Alvo de referência empregado na calibração do dispositivo refletor de Lüneburg;
- Alvos metálicos a serem revestidos por MAREs sobrepostos;
- Antenas tipo corneta Spectrum Technologies modelo DRH 0118 para transmissão e recepção de sinais de RF.

Técnica de medição de redução de STR

A técnica de medição de redução de STR foi realizada em três fases: determinação da condição de campo distante e calibração do *setup* experimental e medidas.

Fase de determinação da condição de campo distante

Para que a condição de campo distante fosse atendida, os alvos e as antenas foram posicionados a uma distância maior que (D) dada pela Eq. 1.¹

$$D = \frac{2 \times L^2}{\lambda} \quad (1)$$

Onde L e λ são respectivamente a largura da antena (22 cm) e o comprimento de onda médio de banda X (0,0375 m). A Eq. 1 é a expressão matemática que define a distância (D) a partir da qual se obtém a condição de campo distante entre um alvo e as antenas irradiadoras. A distância D a ser empregada entre o alvo e a antena varia de acordo com a frequência, conforme valores descritos na Tabela 1.

Tabela 1: Variação da distância (D) para a obtenção da condição de campo distante.

| Frequência (GHz) | Comprimento (m) da onda de banda X em determinada frequência (λ) | Distância (D) para a condição de campo distante (m) |
|------------------|--|---|
| 8,0 | 0,03747405 | 2,58312085 |
| 8,5 | 0,03526970 | 2,74456545 |
| 9,0 | 0,03331020 | 2,90600980 |
| 9,5 | 0,03155710 | 3,06745550 |
| 10,0 | 0,02997924 | 3,22890107 |
| 10,5 | 0,02855166 | 3,39034578 |
| 11,0 | 0,02725386 | 3,55179046 |
| 11,5 | 0,02606891 | 3,71323542 |
| 12,0 | 0,02498270 | 3,87468128 |

É requisito necessário para o método de medidas de STR que as ondas eletromagnéticas cheguem com uma frente plana na face do material sob teste, tomando como referência os valores de distância (D) entre o alvo e a antena descritos na Tabela 1³.

Para obtenção experimental dos valores de redução de STR, foi utilizado inicialmente alvo metálico quadrado simples de 10 cm de lado, denominado nas medidas por substrato metálico. Ele foi apoiado no suporte e fixado no centroide do interior da câmara semianecoica (Fig. 1).

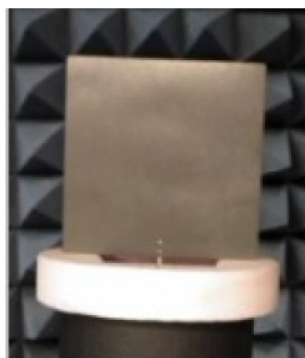


Figura 1: Placa quadrada plana de 10 cm empregada como substrato metálico a ser revestido por MARE.

Fase de calibração do setup experimental

Inicialmente, foi medido o nível de reflexão da câmara semianecoica, vazia, sem o suporte. Foi obtido o valor de -60 dBm, que coincide com a sensibilidade do analisador de espectro gerador de sinais vetorial Keysight modelo E8267D PSG, empregado como receptor de sinal no *setup* de medidas. Nessa fase, pode-se certificar que a antena transmissora estava irradiando somente na direção do fundo da câmara e que inexistia a presença de lóbulos secundários na antena transmissora que interferissem na medida da antena receptora.

Na sequência, realizou-se a medida da câmara semianecoica com o suporte, sem os alvos, para que fosse verificada a presença de sinais espúrios ou ruídos que pudessem interferir ou alterar o valor das medidas dos alvos. Foi obtido o valor de -55 dBm, assegurando-se a qualidade do suporte empregado para as medidas, dada sua pouca influência nos resultados obtidos, quando comparados com a câmara vazia.

Em seguida, foi feita a medida do alvo padrão (o refletor de Lüneburg), conforme Figs. 2 e 3.



Figura 2: Medição da refletividade do refletor de Lüneburg.

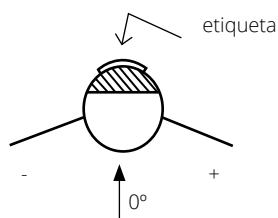


Figura 3: Posição do refletor de Lüneburg em relação às antenas.

O refletor de Lüneburg, ao ser medido na frequência padrão de $9,375$ GHz, obteve como valor da potência refletida $47,94$ dBm, valor condizente com o padrão descrito na documentação do fabricante².

Fase de medidas

Como pode ser visto na Fig. 4, foram utilizadas duas antenas para a realização das medidas: uma para transmissão ligada ao gerador de sinais e outra para recepção ligada ao receptor de sinais.

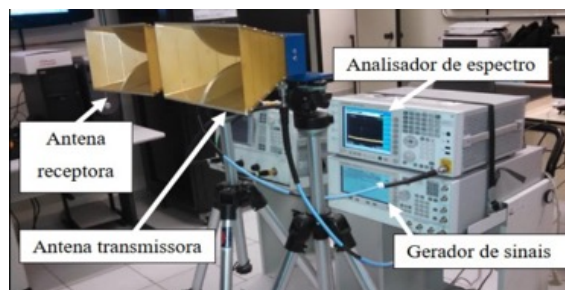


Figura 4: Setup de medição de STR.

Medições

Para a realização do experimento, o alvo da Fig. 1 foi iluminado por ondas transversais elétricas, nas frequências de 8 a 12 GHz, em intervalos de 0,5 GHz. A largura de banda ressonante de 3 MHz, a potência 15 dBm e a modulação em ondas contínuas são necessárias para que a onda irradiada sobre os alvos, mantida durante todo o experimento, não apresente harmônicos, nem respostas espúrias ou transientes².

Após obtidas as medidas de potência refletida em dBm para toda a faixa de frequências para a placa metálica, foram sobrepostos a essa placa um material polimérico sem o preenchimento de MARE e todos os seis MARES (amostras A a F) disponíveis para medida, obtendo-se os resultados descritos na Tabela 2. Para melhor visualização das medições, apresenta-se o gráfico da Fig. 5.

Tabela 2: Medidas de potência refletida pelo alvo metálico e pelos MAREs.

| Frequência (GHz) | Potências refletidas das amostras (dBm) | | | | | | | |
|------------------|---|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Alvo de metal | Polímero sem MARE | A | B | C | D | E | F |
| 8,0 | -27,0 | -28,0 | -41,0 | -36,0 | -35,0 | -33,2 | -36,0 | -34,0 |
| 8,5 | -26,0 | -26,5 | -32,5 | -31,0 | -33,4 | -32,1 | -32,4 | -38,5 |
| 9,0 | -25,7 | -27,0 | -32,2 | -31,2 | -33,7 | -32,1 | -32,0 | -38,8 |
| 9,5 | -27,1 | -29,1 | -31,5 | -30,9 | -35,4 | -31,7 | -31,4 | -38,8 |
| 10,0 | -29,7 | -31,7 | -33,5 | -33,4 | -35,2 | -33,3 | -33,4 | -40,2 |
| 10,5 | -31,0 | -34,0 | -35,9 | -35,3 | -37,4 | -34,5 | -34,7 | -40,1 |
| 11,0 | -31,0 | -33,0 | -34,2 | -34,4 | -37,1 | -34,2 | -33,8 | -42,2 |
| 11,5 | -27,9 | -29,9 | -29,8 | -30,4 | -33,0 | -29,6 | -29,8 | -38,0 |
| 12,0 | -25,7 | -27,7 | -27,5 | -28,3 | -31,6 | -27,1 | -27,5 | -36,6 |

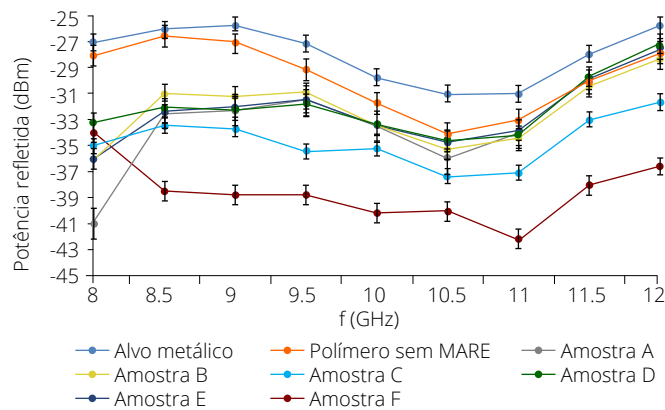


Figura 5: Potência refletida para as amostras em função da frequência da onda eletromagnética incidente em dBm (erro considerado de $\pm 0,8$ dBm).

RESULTADOS E ANÁLISE

A caracterização da STR de alvos pode ser feita a partir da comparação da potência refletida de um alvo revestido por MARE (P_A) e a potência refletida do alvo padrão metálico (P_{ref}). Sendo os alvos revestidos por MARE e o alvo padrão iluminados a uma mesma distância das antenas, pode-se denotar matematicamente que a STR do alvo a ser caracterizado é dado pela Eq. 2.

$$\sigma_d = \left(\frac{P_A}{P_{ref}} \right) \sigma_{ref} \quad (2)$$

Onde σ_d é o RCS do alvo desconhecido em m²; P_A é a potência refletida pelo alvo desconhecido; P_{ref} é a potência refletida pelo alvo de referência; e σ_{ref} é o RCS do alvo de referência em m².

Assim, são apresentados na Tabela 3 os resultados de frequência em que a onda transversal elétrica incidente ($f_{m\acute{a}x}$) apresenta máxima atenuação para os materiais submetidos a teste em GHz e o percentual de redução da STR em relação ao alvo metálico a partir das medições realizadas.

Tabela 3: Medidas de potência refletida pelo alvo metálico e pelos MAREs.

| Material | Freq. de atenuação máxima ($f_{m\acute{a}x}$)(GHz) | STR (m ²) | redução de STR em m ² (%) |
|-------------------|--|-----------------------|--------------------------------------|
| Alvo de meta | 10,5 | 0,1230 | - |
| Polímero sem MARE | 10,5 | 0,1120 | 8,9 |
| A | 8,0 | 0,0945 | 23,2 |
| B | 8,0 | 0,1076 | 12,5 |
| C | 10,5 | 0,1010 | 17,9 |
| D | 10,5 | 0,1100 | 10,6 |
| E | 8,0 | 0,1076 | 12,5 |
| F | 11,0 | 0,0880 | 28,4 |

Para se ter uma base de comparação com meios operativos, os valores típicos³ de STR em termos de dBm são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Valores típicos de STR.

| Objeto | STR (m ²) | STR (dBm) |
|-------------------|-----------------------|-----------|
| Navios | 10.000–100.000 | 40–50 |
| Bombardeiros | 1.000 | 30 |
| Aeronaves de caça | 100 | 20 |
| Carros de combate | 10 | 1 |
| Ser humano | 1 | 0 |

Os resultados de redução de STR em dBm apresentados nas Tabelas 2 e 3 indicam que os MAREs A e F obtiveram os melhores resultados, possuindo elevado potencial para reduzir STR de diversos meios que possuam características como as da Tabela 4 na Banda X, especialmente navios. Já os demais MAREs possuem potencial para emprego em meios com STR abaixo de 30 dBm.

Os bons resultados obtidos em ambiente laboratorial validam a necessidade da realização de testes marítimos com os referidos MAREs de forma a averiguar a efetiva redução de STR em alvo representativo, observadas as condições atmosféricas específicas de um ambiente naval. Vislumbra-se a realização desses testes marítimos com a utilização de um balão inflável de uso da Marinha do Brasil como alvo de oportunidade para a realização de tiro de superfície e verificação de sistemas, conhecido como *balão-alvo*⁴ (*killer tomato*), conforme Fig. 6.

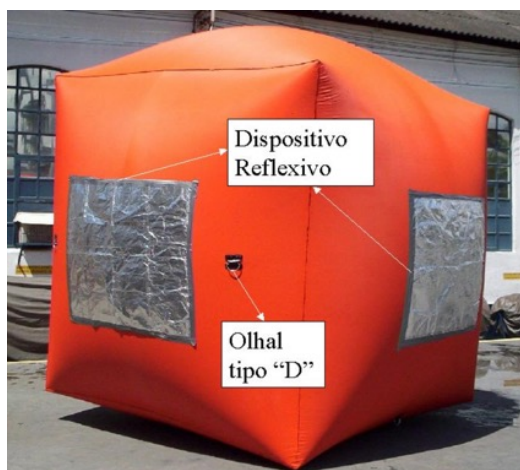


Figura 6: Balão-alvo (*killer tomato*).

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos foram considerados satisfatórios e permitem concluir a validade da hipótese de que todos os MARES fabricados contribuem para a redução da STR de meios navais constituídos por estruturas metálicas na banda X.

Conforme mencionado anteriormente, este trabalho não esgota o tema e se espera que, com a realização dos testes marítimos, seja comprovada, em ambiente operativo naval, a eficiência do uso desses MAREs, e que eles possam, em curto e médio prazo, ser empregados na Marinha do Brasil para aumento da discricção de seus meios navais.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Conceitualização: Matias MS; **Metodologia:** Matias MS; **Investigação:** Gonçalves AP e Lima RC; **Redação – Primeira versão:** Leal E e Costa ACFM; **Redação – Revisão & Edição:** Matias MS; **Aquisição de Financiamento:** Falco APS; **Recursos:** Ferreira PRR; **Supervisão:** Issmael Junior AK.

DISPONIBILIDADE DE DADOS DE PESQUISA

Não aplicável.

FINANCIAMENTO

Financiadora de Estudos e Projetos
<https://doi.org/10.13039/501100004809>
Projeto Materiais Estratégicos
Processo nº 01.09.0546.04.

AGRADECIMENTOS

Não aplicável.

REFERENCES

1. Knott E, Shaeffer J, Tuley M. Radar cross section. 2. ed. Artech House; 1993.
2. Lun'tech. Luneberg Reflectors Bistatic. Technical data sheet. 2010.
3. Sigh E, Mohan RJ. Active RCS reduction, theory and applications. Cambridge: Cambridge University Press; 2015.
4. Zamprônio L. Norma NORCASOP 20-08 – Alvo à deriva tipo “Balão Alvo” (*Killer Tomato*). Niterói: Centro de Apoio a Sistemas Operativos; 2005.