

Comportamento Eletromagnético da Resina Epóxi sob a Ação de Frequências na Banda X em um Radome

Newton A. S. Gomes¹, Braulio H. K. Lopes², Nila C. F. L. Medeiros²,
Leonardo I. Medeiros², Thalita S. Taiariol², Rodrigo G. A. Lima², Sérgio L. Mineiro²,
Maurício R. Baldan²

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil
Aluno de Mestrado do curso de Engenharia e Tecnologia de Materiais e Sensores - CMS.

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

newton.gomes@inpe.br

Resumo. Este trabalho se propõe a investigar o uso da resina epóxi pura, sem aditivos, para a composição de um radome na banda X (8,2 GHz à 12,4 GHz). Foram avaliadas amostras de resina epóxi nas espessuras de 1,43, 2,30, 3,42, 5,59 e 6,16 mm. Foi utilizado um setup com o Vector Network Analyzer para extrair as medidas dos parâmetros S (S_{11} e S_{21}), a permissividade elétrica (ϵ) e a permeabilidade magnética (μ) das amostras. Em cada espessura foram obtidos as porcentagens do parâmetros de transmitância, refletância e absorção eletromagnética. Os resultados evidenciam que as amostras não obtiveram uma transparência eletromagnética satisfatória, obtendo um comportamento mais associado a uma blindagem eletromagnética em função das espessuras avaliadas.

Palavras-chave: Resina Epóxi; Radome; Transparência Eletromagnética.

1. Introdução

O rápido crescimento no uso do espectro eletromagnético para aplicações civis e militares no final do século XX e início do século XXI levou a um crescente investimento por melhorias no desempenho dos sistemas eletromagnéticos. As redes de antenas tem sido foco de desenvolvimentos para aplicações em telecomunicações (VINOTH; VALLIKANNU, 2021), sensores (STÉPHANE et al., 2019) e radares (HOSSAIN et al., 2021), aprimorando o rastreamento e ampliando a largura de banda de operação.

Antenas que possuem uma aplicação em regiões *outdoor* são invariavelmente envolvidas por um radome cujas características de transmissão podem anular, ou pelo menos degradar seriamente o desempenho de funcionalidade das antenas. As características eletromagnéticas do radome são um fator crucial no desempenho geral de qualquer sistema radiante ou receptor, mas o projeto do radome é normalmente dominado por outros fatores, como a requisitos estruturais e térmicos dos materiais (WHALEN et al., 2018).

No projeto de um radome, os aspectos eletromagnéticos não podem ser considerados dissociados dos outros requisitos que contribuem na forma do radome e na escolha dos materiais empregados em sua construção (WHALEN et al., 2018).

Observando a questão dos materiais empregados na construção de um radome, este trabalho se propõe a investigar o uso da resina epóxi pura, sem aditivos, em função da sua espessura no desenvolvimento de um radome monocamada para um sistema de micro-ondas na banda X. Na seção 2 é apresentado a fundamentação teórica, iniciando com o conceito, aplicação e materiais de um radome. Na seção 3 é discutido o uso da resina epóxi e a caracterização eletromagnética das amostras. Ao final, são apresentados os resultados e discussões na seção 4, e na seção 5 as conclusões deste trabalho.

2. Fundamentação Teórica

2.1. Conceito de Radome

A palavra radome é a contração das palavras radar (*RA*dar) com cúpula (*DO*ME), sendo inicialmente utilizado nos primórdios do uso do radar no início do século XX (CADY; KARELITZ; TURNER, 1948). A principal função de um radome é proteger mecanicamente um sistema de antenas dos ambientes encontrados em aplicações terrestres, navais, aerotransportadas e aeroespaciais de ventos, precipitações e impacto de pássaros (CHOI et al., 2011). Eles são moldados para cobrir a antena e fornecer o volume interno necessário para a varredura mecânica da antena. Em função da aplicação, eles fornecem uma configuração aerodinâmica adequada ao meio (NAIR et al., 2015). Na Figura 1 é apresentado um conjunto de aplicações de um radome.

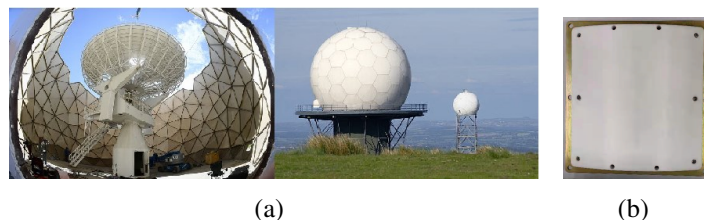


Figura 1. (a) Radome de um sistema de comunicações terrestre para captação de imagens de satélite (MOHAMMED et al., 2019) e (b) conjunto antena-radome de um sistema GNSS (FU; WANG; SU, 2022).

Os requisitos fundamentais de um projeto de radome são norteados pela escolha dos materiais que o constitui, o processo de construção e o peso aceitável para fornecer as margens de segurança necessárias à cada aplicação. Existem vários modelos de radomes desenvolvidos. Na Figura 2 é apresentado um modelo em corte de um radome aeronáutico que encapsula uma antena móvel no interior de sua estrutura.

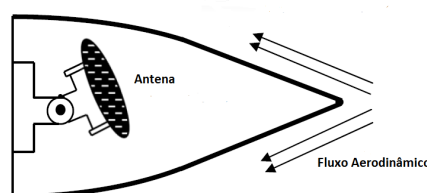


Figura 2. Representação em corte de um radome que contém uma antena de radar sob um fluxo aerodinâmico (NAIR et al., 2015).

Eletricamente, um radome é um obstáculo mecânico com "janelas eletromagnéticas" que consistem em materiais de origem cerâmica ou polimérica (compósitos) no intuito de ser obtido a transparência eletromagnética nas faixa de operação das antenas em uso na sua estrutura mecânica (DASGUPTA, 2015).

A evolução das tecnologias de materiais para radome deve-se, em grande parte, à introdução e desenvolvimento de antenas de micro-ondas, particularmente aquelas destinadas a aplicações aéreas. Os radomes modernos são fabricados com materiais compósitos, como fibra de vidro, quartzo e fibras de aramida, unidos com poliéster, epóxi e outras resinas. Núcleos de espuma e *honeycomb* são frequentemente adicionados entre as camadas internas e externas do radome como materiais espaçadores de baixa constante dielétrica, proporcionando resistência estrutural e rigidez (DASGUPTA, 2015).

Os principais fatores eletromagnéticos que afetam o bom funcionamento da antena e o projeto de um radome são reflexões de micro-ondas das superfícies internas e externas do radome, bem como a absorção da densidade de potência do sinal detectado ou emitido pela antena. Reflexões e absorções de micro-ondas realizadas pelas camadas do radome devem ser mantidas, em valores, os mais baixos possíveis para evitar a perda de potência transmitida que leva a uma redução no alcance do conjunto do radar ou da detecção de algum sinal recebido externamente (CADY; KARELITZ; TURNER, 1948).

3. Materiais e Métodos

3.1. Resina Epóxi

As resinas epóxi são uma classe única de materiais com um elevado número de aplicações industriais. Entre os tipos de resinas, as desenvolvidas a partir da condensação de bisfenol A e epiclоридrina recebem maior atenção devido às suas propriedades mecânicas, reológicas e anticorrosivas. Portanto, elas têm sido amplamente utilizadas nas indústrias automotivas e aeroespaciais, em aplicações como: adesivos, revestimentos, laminados, materiais de encapsulamento de dispositivos eletrônicos e na fabricação de compósitos (HSISSOU et al., 2020) (DAGDAG et al., 2020). O epóxi é um material que possui um baixo peso específico, baixo custo e boas propriedades de amortecimento e resistência mecânica (SINGLA; CHAWLA et al., 2010).

Devido a sua elevada aplicação em compósitos estruturais, as análises mecânicas e térmicas da resina epóxi tem sido desenvolvidas no intuito de utilizá-lo como matriz polimérica empregando vários tipos de reforços, como os nanotubos de carbono (CNT - *Carbon Nanotube*) e a ferro-carbonila (JIN; LI; PARK, 2015). Em função de um crescente efeito das interferências eletromagnéticas (EMI - *ElectroMagnetic Interference*) em sistemas automobilísticos e aeroespaciais, as análises eletromagnéticas de materiais compósitos, de origem poliméricas, vem sendo estudadas no intuito de substituir os materiais metálicos por compósitos (RIBEIRO; GOMES; REZENDE, 2021).

No intuito de avaliar as aplicações eletromagnéticas da resina epóxi para emprego em um radome, foram desenvolvidos um conjunto de amostras a serem analisadas na banda X (8,2 GHz à 12,4 GHz), nas espessuras de 1,43, 2,30, 3,42, 5,59 e 6,16 mm, respectivamente. Nessas amostras foram utilizadas uma resina epóxi comercial distribuída pela empresa *Huntsman*.

3.2. Metodologia de Caracterização Eletromagnética

As medidas foram realizadas em um guia de onda retangular (kit WR-90 P11644A - Agilent) acoplado a um analisador de rede vetorial (VNA - *Vector Network Analyzer*) PNA-L Agilent,

modelo N5230C, cuja função é emular um sinal de radar banda larga na faixa de frequência em estudo em uma potência mais baixa, sendo realizadas medidas em 1601 pontos de frequência na banda X. As propriedades eletromagnéticas, permissividade elétrica (ϵ) e permeabilidade magnética (μ), foram extraídas na banda X.

Através da obtenção dos parâmetros de espalhamento (Parâmetros S) é determinável a interação da onda eletromagnética com a amostra, por meio da obtenção da permissividade elétrica e da permeabilidade magnética. O método utilizado para obter tais parâmetros é o *Nicolson-Ross-Weir* (NRW), também chamado de Método de Transmissão e Reflexão.

Em (1) é apresentada a equação da permissividades elétrica que está associado as propriedades dielétricas do material, onde ϵ_0 corresponde a permissividade elétrica no vácuo, ϵ_r' a parte real da permissividade elétrica, ϵ_r'' a parte imaginária da permissividade elétrica e $\tan \delta_d$ a tangente de perdas dielétricas.

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r = \epsilon_0 (\epsilon_r' - j \epsilon_r'') = \epsilon_0 \epsilon_r' (1 - j \tan \delta_d) \quad (1)$$

Em (2) é apresentada a equação da permeabilidade magnética que está associada as propriedades magnéticas do material, onde μ_0 corresponde a permeabilidade magnética no vácuo, μ_r' a parte real da permeabilidade magnética, μ_r'' a parte imaginária da permeabilidade magnética e $\tan \delta_m$ a tangente de perdas magnéticas.

$$\mu = \mu_0 \mu_r = \mu_0 (\mu_r' - j \mu_r'') = \mu_0 \mu_r' (1 - j \tan \delta_m) \quad (2)$$

Nas Figuras 3(a) e 3(b) são apresentados o *setup* de configuração para a realização das medidas com as amostras construídas. O VNA utilizado é um instrumento eletrônico com 2 portas, porta 1 e 2, que mede o parâmetro de reflexão (S_{11}) e parâmetro de transmissão (S_{21}) em função das frequências em banda X.

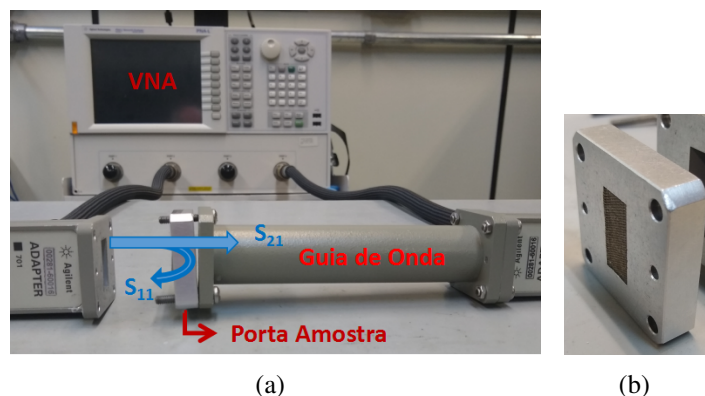


Figura 3. Setup de medidas eletromagnéticas empregando um (a) VNA, um guia de onda e um (b) porta-amostra do tipo WR-90.

Em função dos parâmetros S, medidos no VNA, são obtidos os valores da refletância R, equação (3), da transmitância T, equação (4) e da absorção A, equação (5) (LI et al., 2014)(WANG et al., 2018).

$$R = |S_{11}|^2 \quad (3)$$

$$T = |S_{21}|^2 \quad (4)$$

$$A = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \quad (5)$$

4. Resultados e Discussões

4.1. Parâmetros Eletromagnéticos

A partir da metodologia apresentada na seção 3.2, foram realizados as medidas das amostras no VNA, sendo obtidos os valores dos parâmetros S apresentados na subseção 4.1.1 e dos parâmetros ϵ e μ na subseção 4.1.2.

4.1.1. Parâmetros S

A medição foi realizada no VNA, na banda X. Os resultados são apresentados na escala linear, valores entre 0 e 1 adimensionais. O efeito de reflexão é representado pelo módulo do parâmetro S_{11} , e o efeito de transmissão, o módulo do parâmetro S_{21} .

Os resultados obtidos são apresentados na forma gráfica, sendo o eixo das abscissas os valores das frequências e o eixo das ordenadas os parâmetros S_{11} e S_{21} em função do tipo de espessura das amostras. Na Figura 4 (a-e), é apresentado os valores mensurados de $|S_{11}|$ e $|S_{21}|$, respectivamente as espessuras 1, 43 mm, 2, 30 mm, 3, 42 mm, 5, 59 mm e 6, 16 mm.

4.1.2. Parâmetros ϵ e μ

As medidas de ϵ e μ tem por objetivo identificar o tipo de amostra que está sendo avaliada, no caso, se possui características puramente dielétricas ou puramente magnéticas ou um misto das duas condições.

O meio ar possui um valor de $\epsilon_r = 1$ e $\mu_r = 0$. Isso implica que o ar é um ambiente puramente dielétrico, não havendo perdas no meio, no caso, $\tan \delta_d = \tan \delta_m = 0$. Os parâmetros ϵ'_r , $\tan \delta_d$, μ'_r e $\tan \delta_m$ são apresentados graficamente, sendo esses termos o eixo das ordenadas em função da espessura e no eixo das abscissas, os valores das frequências. As Figuras 5(a), 5(b), 6(a) e 6(b) correspondem respectivamente as medidas do parâmetro ϵ'_r , $\tan \delta_d$, μ'_r e $\tan \delta_m$.

Na Tabela 1 é apresentado os valores médios e do desvio-padrão dos termos ϵ'_r , $\tan \delta_d$, μ'_r e $\tan \delta_m$ em função das espessuras das amostras. Fica evidenciado que ϵ'_r possui um valor médio das médias obtidas no valor de $3,18 \pm 0,01$ e um μ'_r de $0,99 \pm 0,02$. Essa condição implica que a resina epóxi avaliada possui uma característica puramente dielétrica, não sendo detectado nenhum aditivo magnético em sua estrutura.

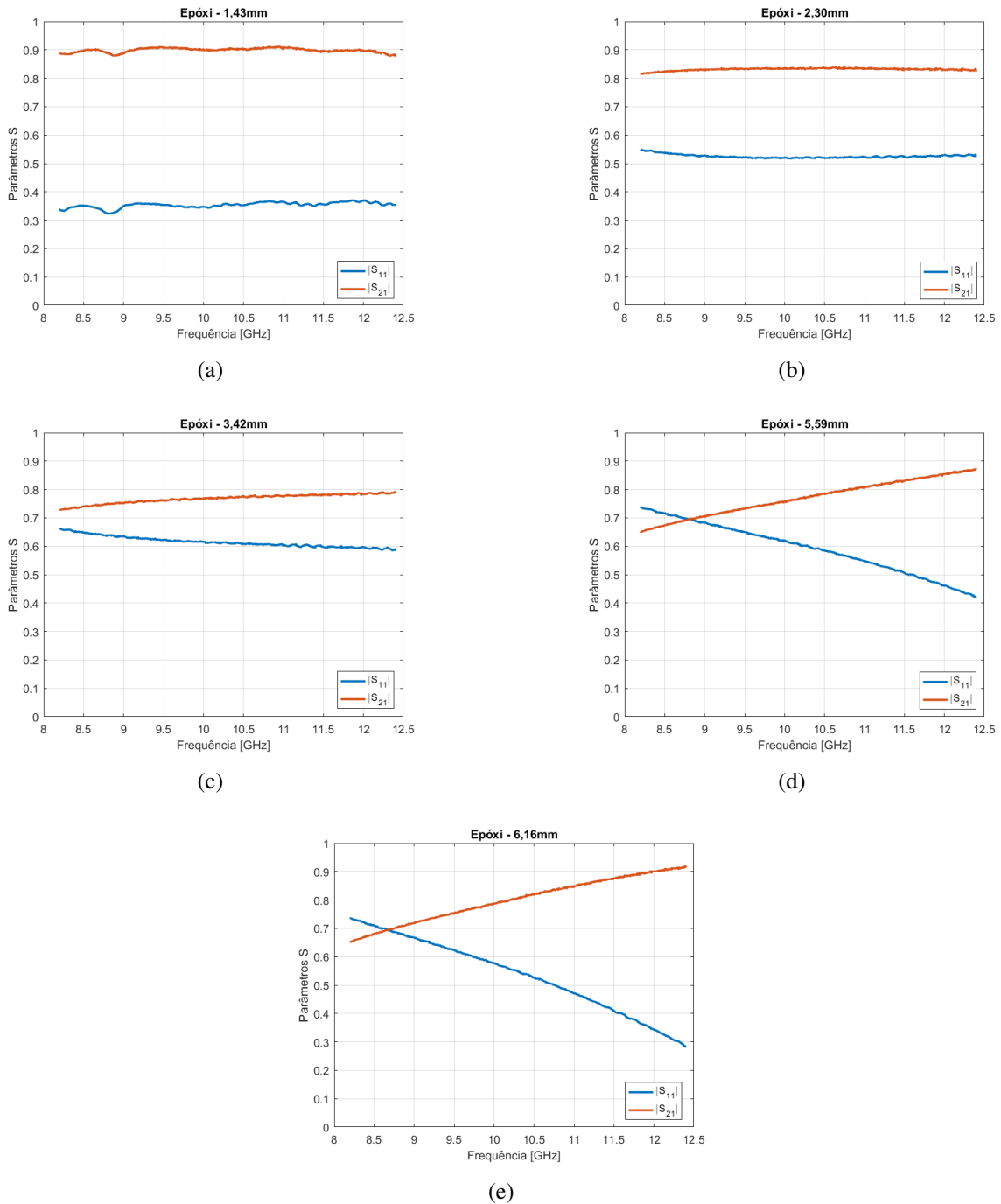


Figura 4. Curva do parâmetro S_{11} e S_{21} da resina epóxi em função da frequência da amostra na espessura de (a) 1,43 mm, (b) 2,30 mm, (c) 3,42 mm, (d) 5,59 mm e (e) 6,16 mm.

4.2. Avaliação da Resina Epóxi

Em função do conjunto de medidas dos parâmetros S (S_{11} e S_{21}) realizados nas amostras de epóxi é obtido um conjunto de informações sobre a refletância R, a transmitância T e a absorção A eletromagnética deste material em função da frequência, para cada espessura mensurada.

Um radome, na condição ideal, corresponde a uma refletância e absorção no valor de 0% e

Tabela 1. Valores médio e desvio-padrão dos parâmetros eletromagnéticos da resina epóxi em banda X.

d [mm]	ϵ'_r	$\tan \delta_d$	μ'_r	$\tan \delta_m$
1,43	$3,10 \pm 0,03$	$0,02 \pm 0,01$	$1,01 \pm 0,05$	$0,13 \pm 0,08$
2,30	$3,20 \pm 0,01$	$0,03 \pm 0,00$	$0,97 \pm 0,01$	$0,01 \pm 0,00$
3,42	$3,20 \pm 0,01$	$0,02 \pm 0,00$	$0,98 \pm 0,01$	$0,00 \pm 0,00$
5,59	$3,20 \pm 0,01$	$0,03 \pm 0,00$	$0,99 \pm 0,01$	$0,00 \pm 0,00$
6,16	$3,20 \pm 0,01$	$0,03 \pm 0,00$	$1,00 \pm 0,00$	$0,00 \pm 0,00$

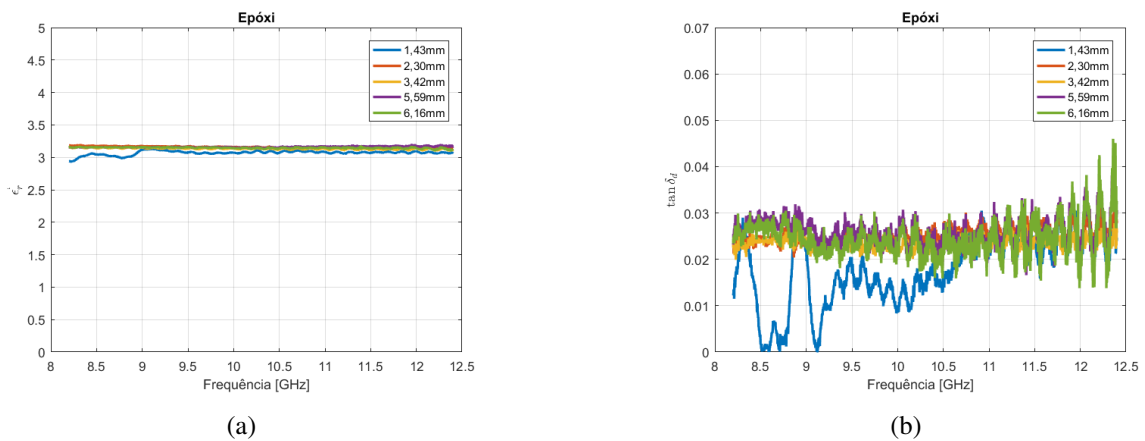


Figura 5. Curva da (a) parte real da permissividade elétrica relativa (ϵ'_r) e da (b) tangente de perdas elétrica ($\tan \delta_d$) da resina epóxi em função da frequência.

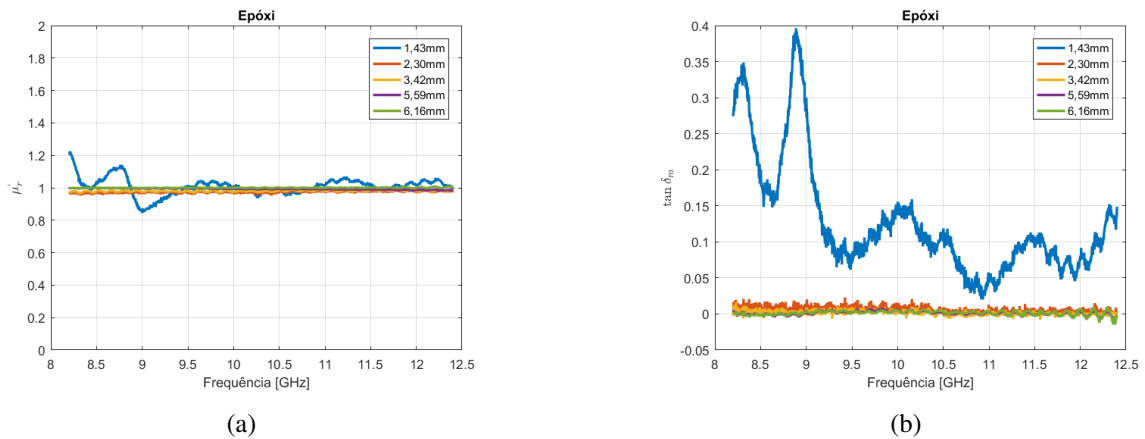


Figura 6. Curva da (a) parte real da permeabilidade magnética relativa (μ'_r) e da (b) tangente de perdas magnética ($\tan \delta_m$) da resina epóxi em função da frequência.

uma transmitância de 100%. Conforme as equações (3), (4) e (5), os parâmetros R, T e A são determinados e apresentados nas Figuras 7(a), 7(b), 7(c), 7(d) e 7(e).

Na espessura de 1,43 mm, Figura 7(a), a resina epóxi possui uma refletância média em torno de 12%, enquanto a transmitância média foi obtida no valor de 80% e uma absorção média de 6%. Essa espessura corresponde a amostra que mais se aproximou dos valores eletromagnéticos da condição mais ideal para um radome correspondendo a uma refletância e absorção média

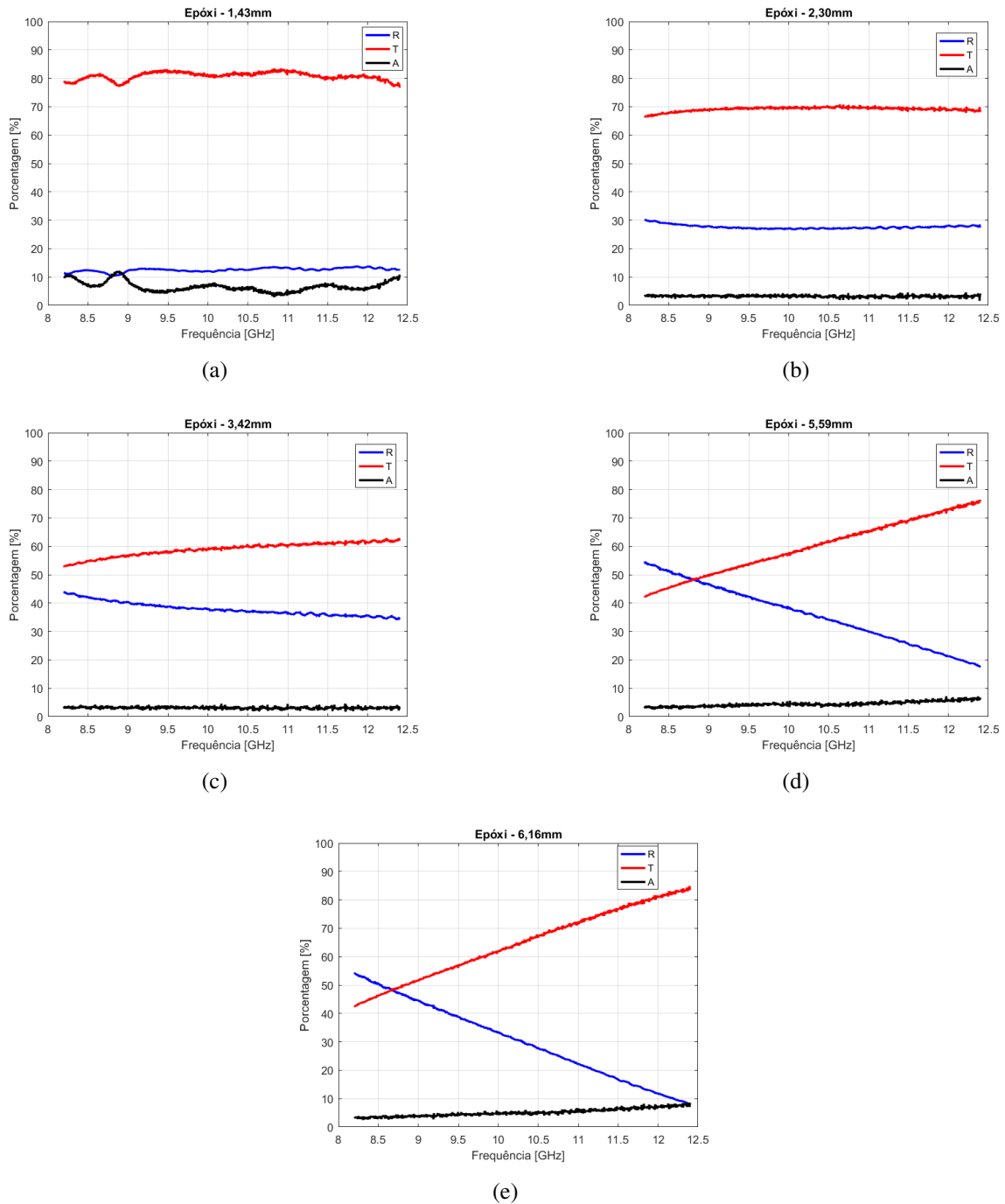


Figura 7. Porcentagem da densidade de potência refletida (R), transmitida (T) e absorvida (A) pela resina epóxi com espessura de (a) 1,43 mm, (b) 2,30 mm, (c) 3,42 mm, (d) 5,59 mm e (e) 6,16 mm.

tendendo a 0% e uma transmitância média no valor de 100%.

Nas espessuras de 2,30, 3,42, 5,59 e 6,16 mm, respectivamente a Figura 7 (b-e), a refletância se eleva em torno de 3 vezes o valor para a espessura de 1,43 mm. Essa condição implica que as espessuras avaliadas são inviáveis para uso na estrutura de um radome na banda X.

O aumento da espessura da resina epóxi apresenta uma diminuição da transmitância e um au-

mento da sua variância implicando em um desvio de funcionalidade de uma antena, caso essa estrutura estiver sendo utilizada para essa aplicação. A partir da espessura de 2,30 mm, o radome passa a ter um comportamento de blindagem eletromagnética com a diminuição da frequência em banda X.

A absorção eletromagnética, em todas as espessuras analisadas possuem um valor próximo do requisito de um radome, ou seja, uma absorção baixa ou nula da onda eletromagnética. Isso está condicionado a existência de uma baixa tangente de perdas dielétrica ($\tan \delta_d$) na resina epóxi.

Na Tabela 2 é apresentado uma síntese das respostas de cada espessura da resina epóxi em função da densidade de potência incidente na amostra, operando na banda X.

Tabela 2. Valores das respostas eletromagnéticas em função das espessuras da resina epóxi

d [mm]	A [%]	R [%]	T [%]
1,43	$6,6 \pm 1,8$	$12,5 \pm 0,7$	$80,8 \pm 1,4$
2,30	$3,2 \pm 0,4$	$27,6 \pm 0,6$	$69,1 \pm 0,7$
3,42	$3,1 \pm 0,4$	$37,9 \pm 2,3$	$59,0 \pm 2,4$
5,59	$4,5 \pm 0,9$	$35,7 \pm 10,3$	$59,8 \pm 9,5$
6,16	$5,1 \pm 1,3$	$30,2 \pm 13,3$	$64,7 \pm 12,1$
Ideal	0,0	0,0	100,0

5. Conclusão

Em função dos resultados obtidos fica evidenciado que, no caso da resina epóxi pura e sem aditivos, mesmo não havendo mudanças das permissividades elétrica e tangentes de perdas das amostras, as espessuras das amostras afetam os parâmetros eletromagnéticos de resposta a excitação de uma onda eletromagnética, na banda X, quando aplicado em uma estrutura como um radome.

O aumento da espessura das amostras diminui a capacidade eletromagnética da resina epóxi de ser empregada como um material de um radome em banda X. O radome, além de seus requisitos estruturais para a proteção de uma antena, deve possuir uma capacidade eletromagnética em função da frequência de operação das antenas que estão contidas em sua estrutura mecânica. Essa condição está associada a manutenção corretiva de radomes e tendo como base esse estudo, caso esse processo empregue o uso de epóxi puro nas espessuras de 1 mm à 6 mm, comprometerá a operacionalidade do radome significativamente.

Nas espessuras estudadas neste trabalho, a resina epóxi não possui uma capacidade de transparência eletromagnética para ondas nas frequências em banda X, não sendo aconselhado seu uso para compor o material de um radome nas espessuras avaliadas, pois o epóxi puro obteve comportamento de um material com características de blindagem eletromagnética.

O não atendimento dos requisitos eletromagnéticos do radome inviabiliza a capacidade operacional das antenas mesmo que estas estejam funcionando corretamente. No intuito de haver uma melhoria contínua dos processos, deve ser realizado um estudo para escolha correta dos materiais que deverá compor um radome. Isso permite o cumprimento dos requisitos eletromagnéticos do radome, não somente na banda X mas em outras bandas de frequência.

Agradecimentos: Os autores gostariam de agradecer ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE e ao Laboratório Associado de Sensores e Materiais – LAS pelos recursos utilizados.

Referências

- CADY, W. M.; KARELITZ, M. B.; TURNER, L. A. *Radar Scanners and Radomes*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1948.
- CHOI, I. et al. Effects of a Damaged Composite Face to the Electromagnetic Wave Transmission Characteristics of Low-observable Radomes. *Composite structures*, Elsevier, v. 93, n. 11, p. 2740–2747, 2011.
- DAGDAG, O. et al. Fabrication of Polymer based Epoxy Resin as Effective Anti-corrosive Coating for Steel: Computational Modeling Reinforced Experimental Studies. *Surfaces and Interfaces*, Elsevier, v. 18, p. 100454, 2020.
- DASGUPTA, S. Polymer Matrix Composites for Electromagnetic Applications in Aircraft Structures. *Journal of the Indian Institute of Science*, v. 95, n. 3, p. 275–296, 2015.
- FU, T.; WANG, X.; SU, P. Design and Implementation of Missile Borne Active Antenna Based on GNSS. In: IEEE. *2022 14th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA)*. [S.l.], 2022. p. 462–466.
- HOSSAIN, M. M. S. et al. Wideband Radomes for Millimeter-Wave Automotive Radars. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, IEEE, 2021.
- HSISSOU, R. et al. Rheological Properties of Composite Polymers and Hybrid Nanocomposites. *Heliyon*, Elsevier, v. 6, n. 6, p. e04187, 2020.
- JIN, F.-L.; LI, X.; PARK, S.-J. Synthesis and Application of Epoxy Resins: A Review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Elsevier, v. 29, p. 1–11, 2015.
- LI, S. et al. Microwave Absorptions of Ultrathin Conductive Films and Designs of Frequency-independent Ultrathin Absorbers. *AIP advances*, American Institute of Physics AIP, v. 4, n. 1, p. 017130, 2014.
- MOHAMMED, H. M. A. et al. Radome Detection from Satellite Images Using ATA-Radome Data Set. In: IEEE. *2019 27th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*. [S.l.], 2019. p. 1–4.
- NAIR, R. U. et al. Temperature-dependent Electromagnetic Performance Predictions of a Hypersonic Streamlined Radome. *Progress In Electromagnetics Research*, EMW Publishing, v. 154, p. 65–78, 2015.
- RIBEIRO, B.; GOMES, N. A. S.; REZENDE, M. C. Lightweight Multi-walled Carbon Nanotube Buckypaper/glass Fiber-Epoxy Composites for Strong Electromagnetic Interference Shielding and Efficient Microwave Absorption. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, Springer, v. 32, n. 11, p. 14494–14508, 2021.
- SINGLA, M.; CHAWLA, V. et al. Mechanical Properties of Epoxy Resin-fly Ash Composite. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, v. 9, n. 3, p. 199–210, 2010.
- STÉPHANE, H. et al. X-Band Sampling Technology Demonstration. In: IEEE. *2019 8th International Workshop on Tracking, Telemetry and Command Systems for Space Applications (TTC)*. [S.l.], 2019. p. 1–5.
- VINOTH, M.; VALLIKANNU, R. Design and Analysis of Metamaterial Patch Antenna 5G and X Band Applications. In: IEEE. *2021 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)*. [S.l.], 2021. p. 1–6.
- WANG, Q. et al. Analysis of Triple-band Binary Metamaterial Absorber based on Low-permittivity All-dielectric Resonance Surface. *Journal of Advanced Dielectrics*, World Scientific, v. 8, n. 03, p. 1850021, 2018.
- WHALEN, E. et al. Aircraft Radome Characterization via Multiphysics Simulation. In: IEEE. *2018 AMTA Proceedings*. [S.l.], 2018. p. 1–4.