

Investigação do Comportamento Eletromagnético de Cerâmicas de Ultra Alta Temperatura HfB_2 para Aplicação na Banda X

Inês M. V. Pinheiro, Camila P. Mendes, Gisele Amaral Labat, Divani Gavinier, Thalita Sani-Taiariol, Sérgio Mineiro e Maurício R. Baldan
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos/SP – Brasil

Resumo: Este trabalho investiga o comportamento eletromagnético de compósitos de diboreto de háfnio (HfB_2) incorporados em matriz de resina epoxídica para aplicações na banda X (8,2 - 12,4 GHz), visando o desenvolvimento de materiais para controle de interferência eletromagnética (EMI) em sistemas defensivos. Amostras com alta concentração de HfB_2 (80% e 90% em massa) foram preparadas e caracterizadas quanto à sua morfologia por microscopia eletrônica de varredura (MEV-FEG) e estrutura cristalina por difratometria de raios X (DRX), confirmando a estrutura hexagonal do HfB_2 e a incorporação efetiva na matriz polimérica. A caracterização eletromagnética foi realizada utilizando um (VNA), medindo-se a refletividade contra um Condutor Elétrico Perfeito (PEC) e as propriedades dielétricas complexas ($\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$). Os resultados experimentais mostraram um comportamento compatível com materiais para radomes, que requerem transparência parcial ao radar. Simulações numéricas revelaram que, ao ajustar a espessura para 13,8 mm, esta mesma amostra poderia atingir RL de -34,62 dB na frequência de 8,46 GHz, indicando forte potencial como material absorvedor seletivo em aplicações específicas. Os resultados demonstram que os compósitos HfB_2 -epóxi podem ter sua resposta eletromagnética modulada através do ajuste da espessura e concentração de carga, possibilitando aplicações tanto como materiais parcialmente transparentes (radomes) quanto como absorvedores seletivos de alta eficiência em frequências específicas da banda X, contribuindo para o desenvolvimento de novos materiais para sistemas defensivos avançados.

I. INTRODUÇÃO

A motivação central desta pesquisa foi a identificação de materiais eficazes no controle da interferência eletromagnética, tanto por mecanismos de blindagem (*shielding*) quanto por absorção (MARE – Material Absorvedor de Radiação Eletromagnética). A seleção do diboreto de háfnio (HfB_2) baseou-se em suas propriedades excepcionais, como elevado ponto de fusão, alta dureza, estabilidade química além de sua capacidade de absorção de radiação, atribuída à presença do Háfnio (elemento de alta massa atômica relativa, $Z = 178,486$) e Boro (conhecido absorvedor de nêutrons térmicos). Essas características tornam o HfB_2 um material promissor, especialmente quando incorporado a matrizes poliméricas leves e versáteis, como a resina epóxi. É importante salientar que, até o momento, não foram encontrados estudos experimentais que avaliem diretamente a eficácia de compósitos à base de HfB_2 para blindagem ou absorção de interferência eletromagnética (EMI) em faixas de frequência específicas para aplicações aeroespaciais ou de defesa. Embora o trabalho de Erdogan et al. (2024) represente um avanço nesse campo, sua investigação focou na blindagem contra radiação gama, utilizando uma fonte de ^{152}Eu , e contra nêutrons térmicos, por meio de uma fonte de Am-Be, sem abordagem específica da EMI em bandas eletromagnéticas aplicáveis a sistemas defensivos.

II. MATERIAIS E METODOLOGIA

As amostras foram feitas com pó de HfB_2 incorporado a resina epoxídica nas proporções de 80 e 90% em massa.

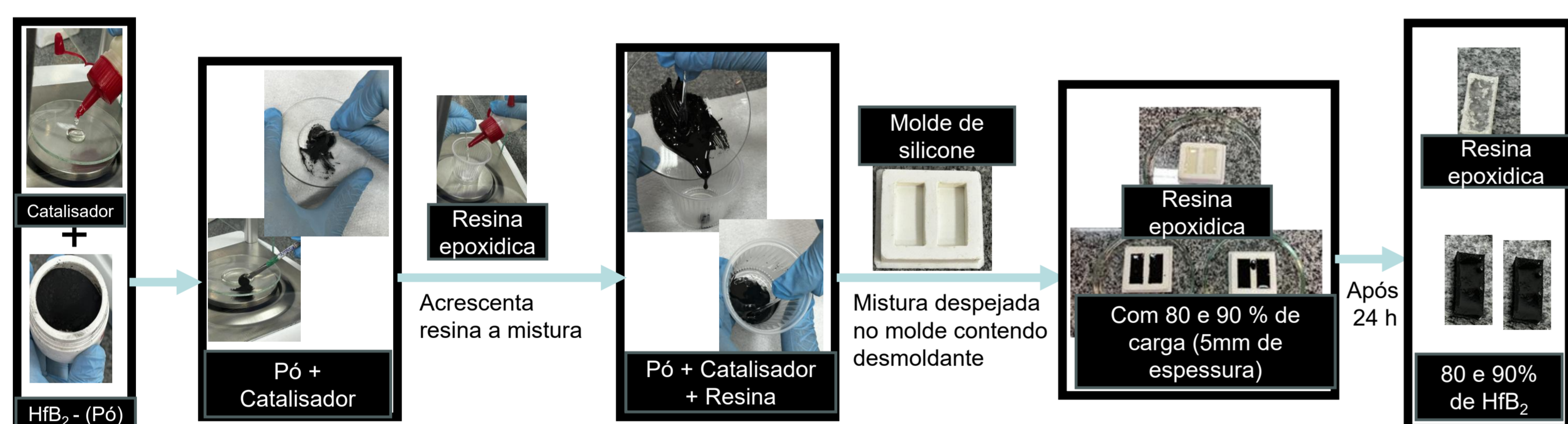


Figura 1 – Fluxograma do processo experimental.

A morfologia das partículas do pó de HfB_2 foi caracterizada por MEV-FEG (Tescan, Mira3), enquanto que as amostras obtidas foram caracterizadas por difratometria de raios X em um difratômetro da marca Phillips Analytical X'Pert, com radiação $\text{Cu K}\alpha$ ($\lambda = 1,54 \text{ \AA}$), entre 20° e 90° (2θ), com passo de $0,02^\circ$ e tempo de contagem de 5 s.

A caracterização dos compósitos foi realizada por meio de um analisador de rede vetorial (Vector Network Analyzer - VNA) na faixa de frequência de 8,2 a 12,4 GHz, utilizando o kit de guia de ondas X11644A, para avaliar as propriedades eletromagnéticas das amostras.

A refletividade foi medida usando um Condutor Elétrico Perfeito (PEC) e as propriedades dielétricas ($\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$) [1], foram medidas pelo VNA.

A simulação foi realizada apenas para a amostra com o melhor controle da interferência eletromagnética.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 mostra a morfologia das estruturas de HfB_2 e o resultado do DRX do HfB_2 , cujo padrão de difração está de acordo com a ficha padrão número 01-089-3651 (HfB_2) com estrutura cristalina hexagonal (GAO et al., 2022; Erdogan et al., 2023). Na Figura 2c vê-se o difratograma comparativo das amostras com 5 mm de espessura, variando-se o percentual de adição de HfB_2 à matriz de silicone com catalisador. Observa-se que, com o aumento da fração de carga na mistura, há uma redução na intensidade do pico característico da resina. Além disso, não foram identificados picos atribuíveis a impurezas ou possíveis contaminantes no espectro.

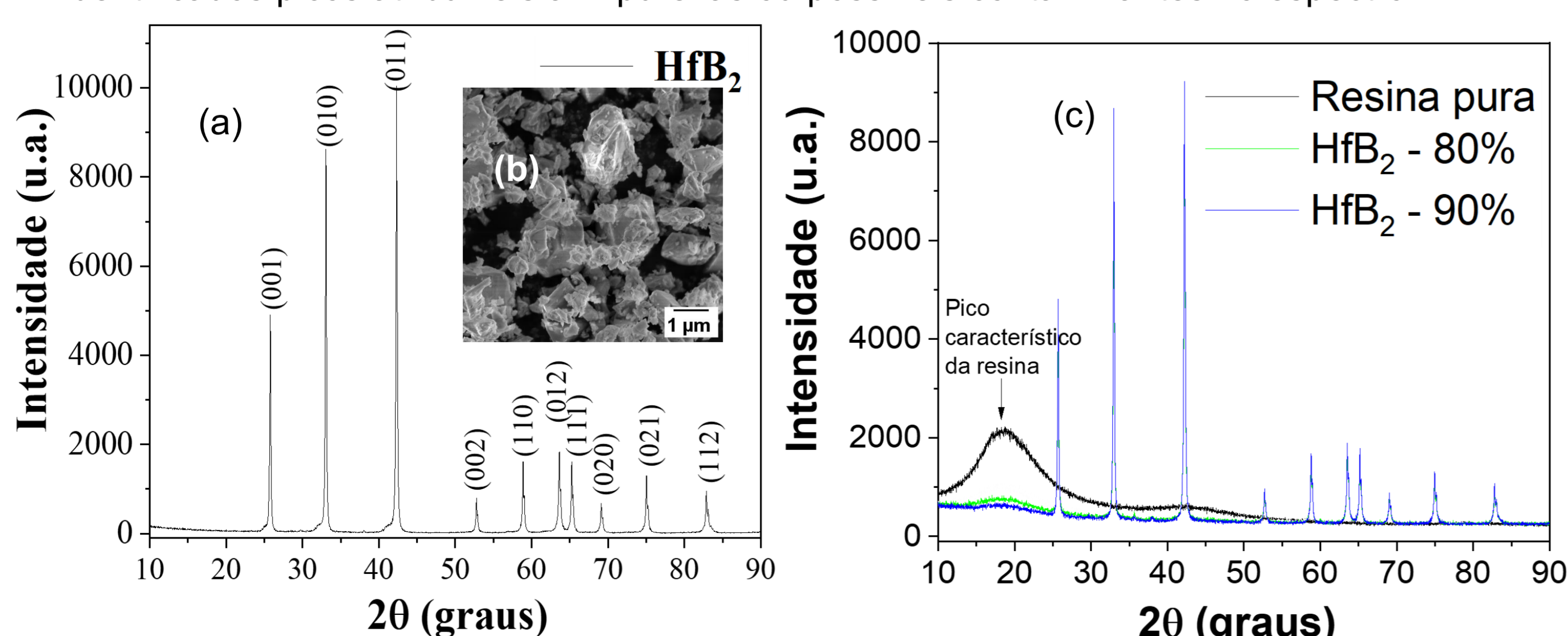


Figura 2 – Resultados obtidos da difratometria do pó de HfB_2 (a), micrografia do pó (b), difração de Raio X da resina pura, com incorporação de carga de HfB_2 80% e 90% de HfB_2 em massa (c).

Os valores de *Reflection Loss* (RL) medidos experimentalmente estão entre 0 e -1,2 dB. Isso é compatível com aplicações como radome, em que se busca transparência eletromagnética parcial, e não materiais com forte absorção (os quais requerem $\text{RL} \leq -10 \text{ dB}$). Sendo assim, ambas as amostras não funcionam como absorvedores clássicos, mas mostram características interessantes para controle seletivo de EM em estruturas que devem permitir passagem parcial do sinal, como radomes.

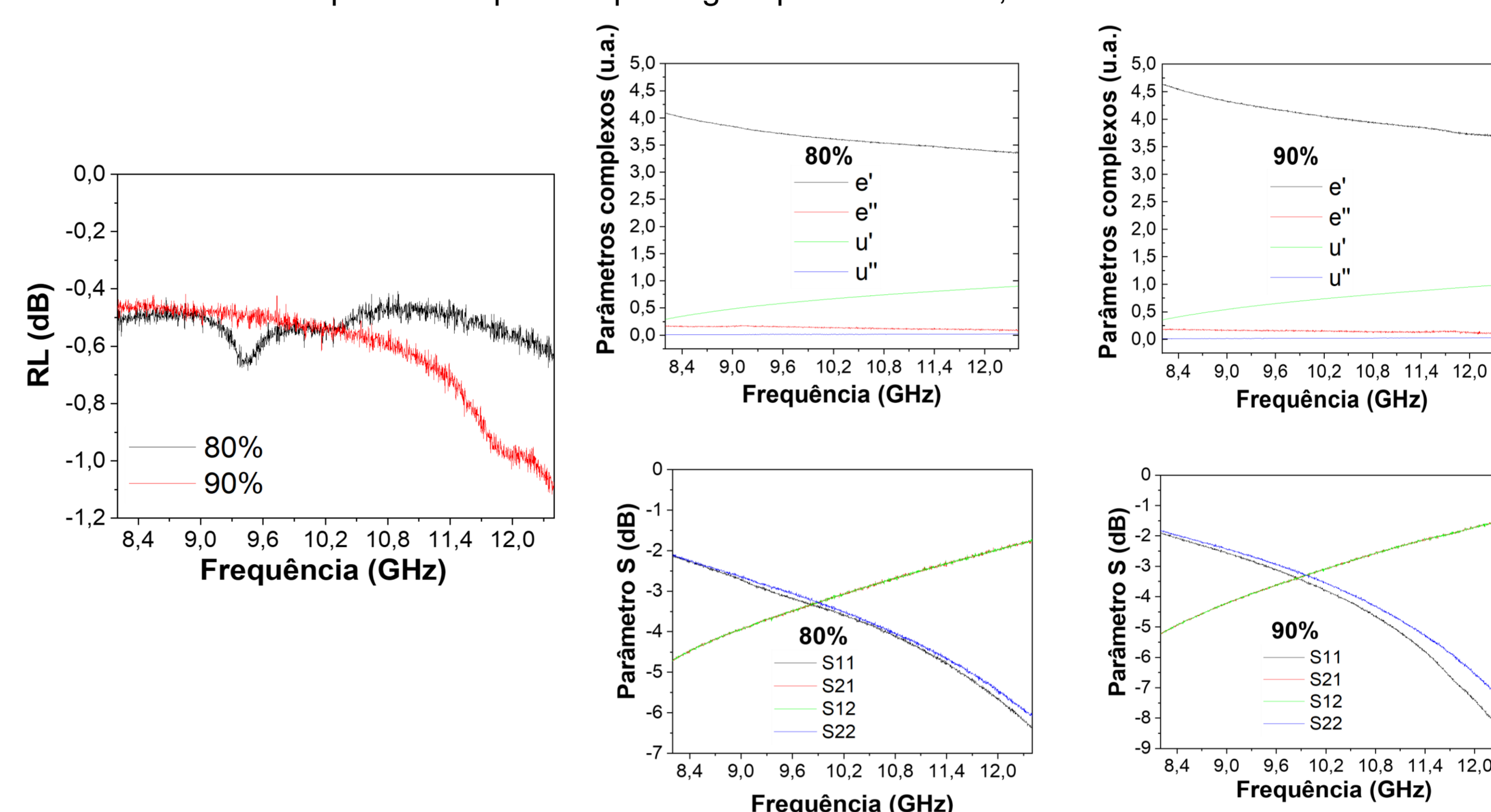


Figura 3 – Comportamento eletromagnético das amostras de resina com incorporação de 80% e 90% de carga de HfB_2 .

A Figura 4 indica que a melhor espessura encontrada através da simulação para amostra de resina com 90% de HfB_2 , a qual possui 5 mm de espessura, seria de 13,80mm, sendo a perda de reflexão (RL) simulada de -34,62dB, na frequência de 8,46 GHz.

Esse resultado indica que, com espessura adequada, o compósito com 90% de HfB_2 pode apresentar alto desempenho como absorvedor em frequência específica, mesmo sendo originalmente transparente em baixa espessura.

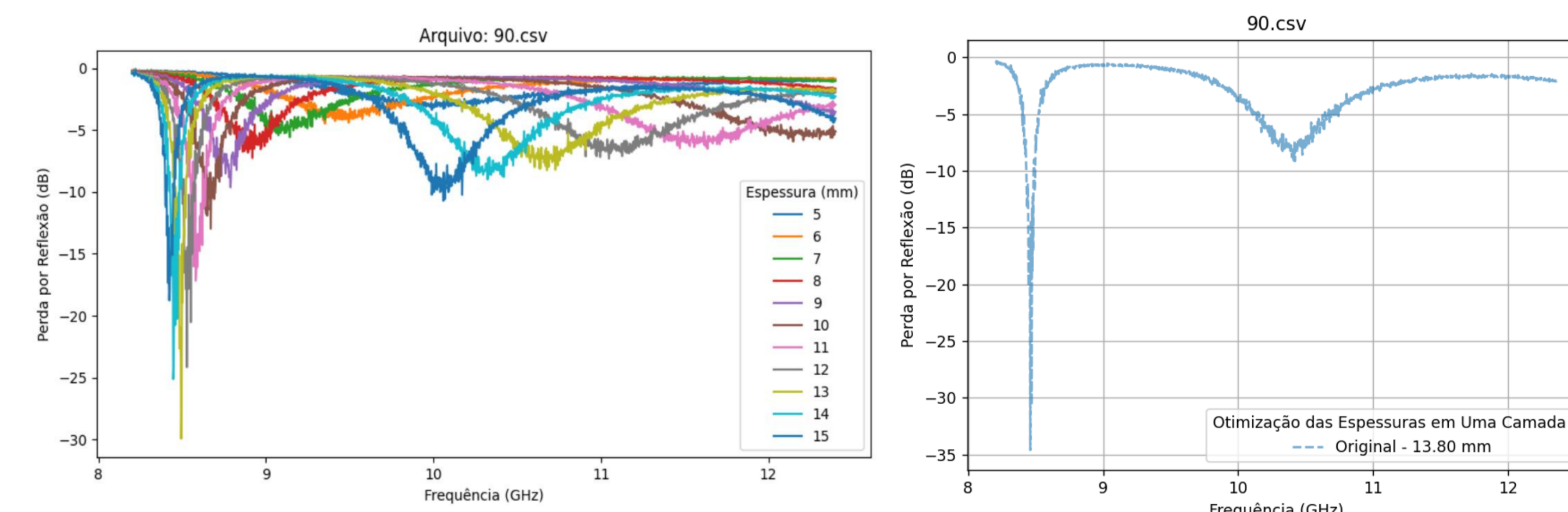


Figura 4 - Simulação da perda por reflexão (RL) e da variação da espessura para a amostra com melhor RL.

IV. CONCLUSÃO

As amostras com 80% e 90% em massa de HfB_2 incorporado à resina epoxídica foram caracterizadas na banda X (8,2–12,4 GHz) por meio de VNA com guia de ondas X11644A. Um achado importante deste estudo foi evidenciado pelas simulações numéricas: ao ajustar a espessura para 13,8 mm, o compósito com 90% de HfB_2 pôde atingir RL de -34,62 dB na frequência específica de 8,46 GHz, transformando-o em um potencial material absorvedor seletivo (MARE) de alta eficiência. Esta dualidade funcional, capacidade de atuar tanto como material parcialmente transparente quanto como absorvedor seletivo, dependendo da espessura, representa uma contribuição significativa para o desenvolvimento de materiais avançados para sistemas defensivos. A modulação da resposta eletromagnética através do ajuste de espessura e concentração de carga demonstra a versatilidade destes compósitos para aplicações específicas em tecnologias de defesa.

REFERÊNCIAS

- Gao, J.; Yang, Y.; Ren, Y. et al. A novel hafnium boride catalyst for vanadium redox flow battery. *Ionics* 28, 4273–4282 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11581-022-04656-7>.
- Erdogan, F.; Rojas, J.; Goddard, B. Shielding performance of epoxy matrix composites reinforced with HfB_2 nanoparticles. *American Nuclear Society, Indianapolis*, p. 872-875, 2023. <https://doi.org/10.13182/T128-42155>.