

Imunidade Eletromagnética em Manufatura Aditiva com Recobrimentos Condutivos: Uma análise de viabilidade

Andre Souza, Gabriel Fré, Marco Kanekiyo, Murilo Ben and Alessandro Luz

Abstract—This work investigates the use of conductive coatings applied to additively manufactured polymer enclosures as a low-cost alternative for electromagnetic shielding. Different surface treatment methods were applied to PLA samples in order to evaluate their shielding effectiveness at 2.4 GHz. The results show that the proposed treatments enable attenuation levels approaching 30 dB. In addition to the experimental characterization, a techno-economic analysis is presented, indicating that the proposed solution is economically competitive for small-scale production and applications.

Keywords—EMI shielding, 3D printing, conductive coatings, additive manufacturing.

Resumo — Este trabalho avalia a utilização de recobrimentos condutivos em invólucros poliméricos produzidos por manufatura aditiva como alternativa de baixo custo para blindagem eletromagnética. Diferentes tratamentos superficiais foram aplicados a amostras de PLA e sua efetividade de blindagem foi caracterizada em 2.4 GHz. Os resultados mostram que os métodos propostos permitem atingir atenuações próximas de 30 dB. Adicionalmente, é apresentada uma análise técnico-econômica que indica a viabilidade da solução para aplicações e produções em pequena escala.

Palavras-chave — blindagem eletromagnética (EMI), impressão 3D, revestimentos condutivos, manufatura aditiva.

I. INTRODUÇÃO

No desenvolvimento de dispositivos eletroeletrônicos em que a geometria do invólucro desempenha papel funcional, a manufatura aditiva surge como uma alternativa amplamente difundida, oferecendo liberdade de forma e baixo custo para prototipagem [1]. Entretanto, sua aplicação permanece limitada em cenários com requisitos rigorosos de compatibilidade eletromagnética (EMC/EMI). Nesses casos, a solução tradicional consiste no uso de invólucros metálicos que, embora eficazes, apresentam custos significativamente superiores, especialmente em prototipagem, pequenos lotes e geometrias complexas [2].

A combinação de liberdade geométrica, baixo custo e atendimento a requisitos de imunidade eletromagnética constitui um desafio recorrente em projetos de sensores corporais e dispositivos vestíveis, como relógios inteligentes, fones de ouvido e módulos biométricos [3]. Nesses produtos, a forma do invólucro influencia diretamente aspectos ergonômicos, ópticos, acústicos e radioelétricos, ao mesmo tempo em que devem ser atendidos requisitos rigorosos de EMC [4].

Embora a manufatura aditiva possibilite a fabricação de geometrias complexas, a dependência de invólucros metálicos limita sua adoção em prototipagens, lotes-piloto e validações, onde os custos unitários são elevados [5]. Estruturas metálicas contínuas ou gaiolas de Faraday constituem a solução clássica para blindagem eletromagnética, oferecendo atenuações de dezenas de decibéis desde que sua continuidade elétrica seja preservada [5], [6]. Contudo, sua aplicação torna-se menos atrativa em projetos com formas complexas ou ergonomicamente acopladas ao usuário. Em contrapartida, polímeros amplamente utilizados na impressão 3D, como ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*) e PLA (*Polylactic Acid*), não apresentam capacidade intrínseca de blindagem [5]. Embora filamentos condutivos e compósitos com cargas metálicas representem alternativas viáveis, essas soluções apresentam custos mais elevados e demandam maior controle do processo de fabricação [7], [8]. Diante dessas limitações, este trabalho avalia diferentes recobrimentos condutivos aplicados a substratos de PLA produzidos por manufatura aditiva, investigando a efetividade de blindagem em 2,4 GHz e a viabilidade econômica da abordagem.

A. Objetivo

Este trabalho investiga uma solução para a produção de invólucros poliméricos por impressão 3D combinada à aplicação de recobrimentos condutivos (tintas metálicas) por spray, aerografia ou pincelamento — técnica amplamente empregada para conferir condutividade superficial e blindagem a plásticos de engenharia [5], [6], [9]. Apesar do custo acrescido pelos métodos de recobrimento, esses revestimentos permanecem competitivos em pequenas séries e preservam integralmente a liberdade geométrica. Em contraste, soluções metálicas apresentam custos crescentes à medida que a complexidade da peça aumenta [10], [11].

A abordagem aqui analisada combina a flexibilidade da manufatura aditiva com as propriedades eletromagnéticas de superfícies condutivas, fundamentando-se em princípios clássicos de reflexão, absorção e controle de descontinuidades para alcançar níveis efetivos de blindagem.

II. METODOLOGIA

Partindo da hipótese de que recobrimentos condutivos aplicados a invólucros poliméricos impressos em 3D podem prover níveis efetivos de blindagem eletromagnética, conforme indicado em trabalhos recentes [5], foram fabricadas amostras

em PLA com geometria padronizada e aplicados diferentes tratamentos superficiais. Em seguida, a efetividade de blindagem obtida foi comparada à amostra de referência, sem recobrimento. A análise adota duas abordagens complementares: (i) posiciona-se a sonda receptora no interior das caixas para avaliar a blindagem quanto à presença de irradiações externas; e (ii) posiciona-se a sonda irradiadora no interior das amostras para quantificar a capacidade de contenção da estrutura, quanto ao vazamento de energia de radiofrequência para o exterior. Em ambos os ensaios, utiliza-se a frequência de 2.4 GHz, por se tratar de um canal de comunicação amplamente utilizado para as aplicações típicas de projetos desta natureza.

A. Amostras

Foram produzidas quatro caixas no formato de paralelepípedo retangular, impressas em PLA sem aditivos condutivos, devido ao seu baixo custo, ampla disponibilidade e facilidade de processamento. A Fig. 1 apresenta o modelo utilizado.

A área superficial S das amostras, necessária para posterior análise de rendimento dos materiais de recobrimento e custo, é calculada por meio de: [12]

$$S = 2(ab + ac + bc). \quad (1)$$

em que, os parâmetros $a = 40$ mm, $b = 60$ mm e $c = 87.5$ mm, podem ser visualizados na Fig. 1. Neste caso, a área superficial das amostras é $S = 22\,300$ mm².

Foram avaliadas quatro condições: (i) caixa em PLA sem recobrimento; (ii) tinta condutiva de níquel em aerossol [13]; (iii) tinta de cobre revestido de prata [14]; e (iv) fita adesiva de cobre [15]. Os materiais foram selecionados conforme as recomendações de uso para aplicações EMC/EMI [13], [14].

B. Métodos de avaliação

A efetividade de blindagem foi quantificada comparando-se a amostra de referência ($i = 0$) às amostras tratadas ($i = 1, 2, 3$), utilizando-se:

$$SE_{0,i}[\text{dB}] = P_0[\text{dBm}] - P_i[\text{dBm}], \quad (2)$$

onde P_i é a potência medida para cada tipo de tratamento. Os ensaios foram conduzidos em região de Fresnel (campo próximo), entre 10–30 cm, condição esperada para dispositivos compactos operando em 2.4 GHz, com $\lambda \approx 12.5$ cm [16].

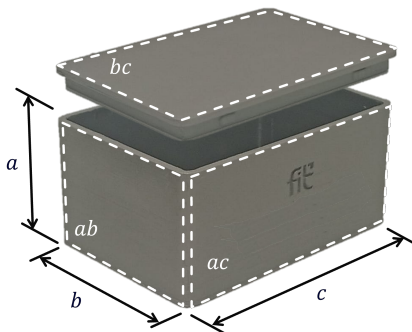


Fig. 1. Construção das amostras e preparação dos recobrimentos condutivos.

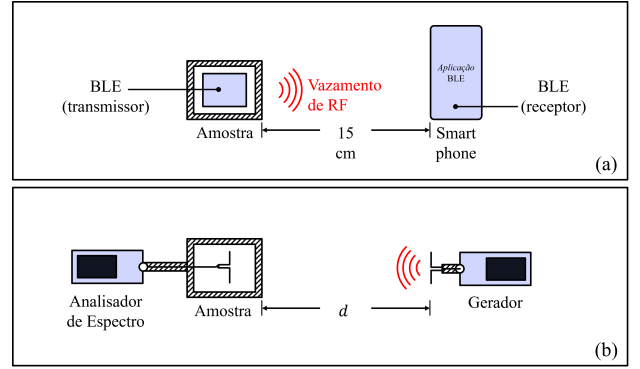


Fig. 2. Esquema utilizado para avaliar a efetividade de blindagem produzida pelos diferentes métodos de recobrimento de superfícies aplicados nas amostras. (a) Arranjo para teste confinamento (BLE/RSSI, métrica relativa ΔRSSI). (b) Arranjo para teste de blindagem quanto a proteção de EMI externas, (CW, leitura em dBm e SE formal dada por $P_0 - P_i$).

1) *Confinamento*: O teste de confinamento avaliou a capacidade da estrutura em atenuar a propagação de energia irradiada para o meio externo. O transmissor foi posicionado dentro de cada caixa a 15 cm do receptor (Fig. 2(a)). Utilizou-se um enlace BLE entre um microcontrolador Nordic® nRF52840 [17] e um smartphone Motorola MotoG84 [18], monitorado pelo aplicativo *nRF Connect for Mobile* [19].

O parâmetro de análise adotado foi o RSSI (*Received Signal Strength Indicator*), disponibilizado pela pilha BLE (*Bluetooth Low Energy*) [20]. Por não se tratar de uma grandeza metrológica rastreável, os resultados são interpretados como indicadores relativos. Para mitigar variabilidades, mantiveram-se constantes hardware, distância, geometria e perfil de transmissão. Assim, definiu-se a métrica relativa:

$$\Delta\text{RSSI}_{0,i}[\text{dB}] = \text{RSSI}_0 - \text{RSSI}_i. \quad (3)$$

Ressalta-se que essa métrica não equivale à efetividade de blindagem (SE) formalmente definida pela IEEE 299 [21],

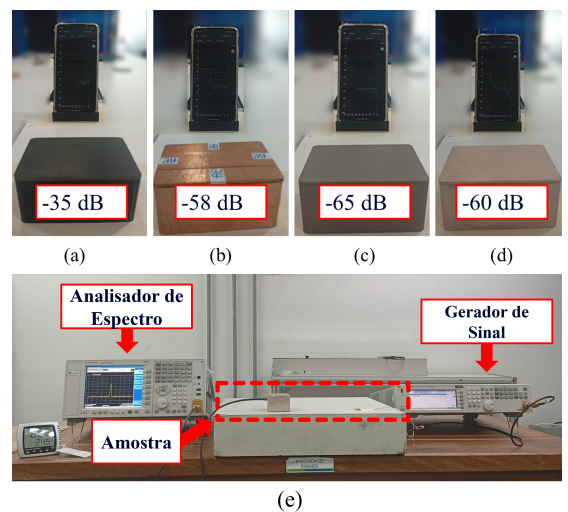


Fig. 3. Testes de confinamento em bancada com dispositivo móvel atuando como receptor do sinal vazante, uma vez que o transmissor é colocado dentro das amostras.

sendo empregada apenas como indicador comparativo entre as amostras avaliadas.

2) *Blindagem*: O teste de blindagem avaliou a proteção contra irradiações externas. Uma antena sintonizada em 2.4 GHz foi posicionada dentro da caixa, enquanto uma antena idêntica, conectada a um gerador Agilent® N5183A [22], irradiava uma onda contínua de 20 dBm. A distância entre as antenas foi variada, conforme Fig. 2(b). As medições foram realizadas com um analisador de espectro Keysight CXA N9000A [23]. Para cada amostra, registrou-se a potência recebida no analisador de espectro na frequência de 2.4 GHz, utilizada posteriormente no cálculo da efetividade de blindagem conforme (3).

III. RESULTADOS

Os experimentos realizados tiveram por objetivo comparar a efetividade de blindagem entre as três amostras tratadas e a amostra de referência em PLA sem recobrimento. As medições foram conduzidas nos dois cenários descritos anteriormente (*Confinamento* e *Blindagem*) permitindo avaliar tanto o vazamento de energia para o ambiente quanto a susceptibilidade à irradiação externa.

A. Contenção de radiofrequência

Este teste avaliou a capacidade das amostras em conter energia de radiofrequência irradiada a partir do seu interior. O receptor foi posicionado a 15 cm da amostra. Os resultados da Fig. 4 mostram que todos os tratamentos superficiais proporcionaram atenuação superior a 23 dB em relação ao invólucro sem recobrimento. A tinta de níquel apresentou o melhor desempenho, com contenção superior a 30 dB, correspondente a uma redução aproximada de três ordens de magnitude da potência recebida.

B. Proteção contra IEM externas

Este teste avaliou a capacidade das amostras em atenuar ondas irradiadas por uma fonte de 2.4 GHz a 20 dBm, para distâncias entre 10 e 30 cm. Conforme apresentado na Fig. 4, a fita adesiva de cobre apresentou o pior desempenho, com atenuação cerca de 23 dB inferior à dos demais recobrimentos. Esse comportamento é atribuído a descontinuidades introduzidas durante a aplicação da fita, comprometendo a continuidade elétrica da blindagem. Para distâncias superiores a 10 cm, os recobrimentos de níquel e cobre-prata apresentaram atenuações próximas de 30 dB, correspondendo à transmissão inferior a 1% da potência incidente e demonstrando desempenho adequado para aplicações de baixa e média sensibilidade eletromagnética.

C. Rendimento

Como forma de estabelecer um critério de viabilidade para o método de mitigação da falta de EMI em invólucros produzidos por manufatura aditiva convencional, estuda-se o rendimento que os tratamentos superficiais propostas apresentam, bem como o custo estimado da amostra após aplicação. Este custo pode ser comparado com peças similares de mercado a fim de que possa trazer uma referência tanto dos benefícios radioelétricos quanto financeiros associados ao uso dos métodos aqui propostos. Para o dimensionamento do consumo e do rendimento das tintas metálicas, a estimativa foi realizada com base nas especificações técnicas fornecidas pelo fabricante.

O primeiro parâmetro a se levar em conta é a área total S a receber o tratamento, seja pelas tintas metálicas [13], [14], seja pela fita adesiva [15]. A área superficial do invólucro é calculada por (1), resultando em um valor total de 22 300 mm². A concepção do protótipo pode ser vista na Fig. 1. Apesar da proposta deste trabalho estar baseada em geometrias complexas, optou-se por utilizar um sólido no formato de paralelepípedo retangular para que se torna-se mais fácil a

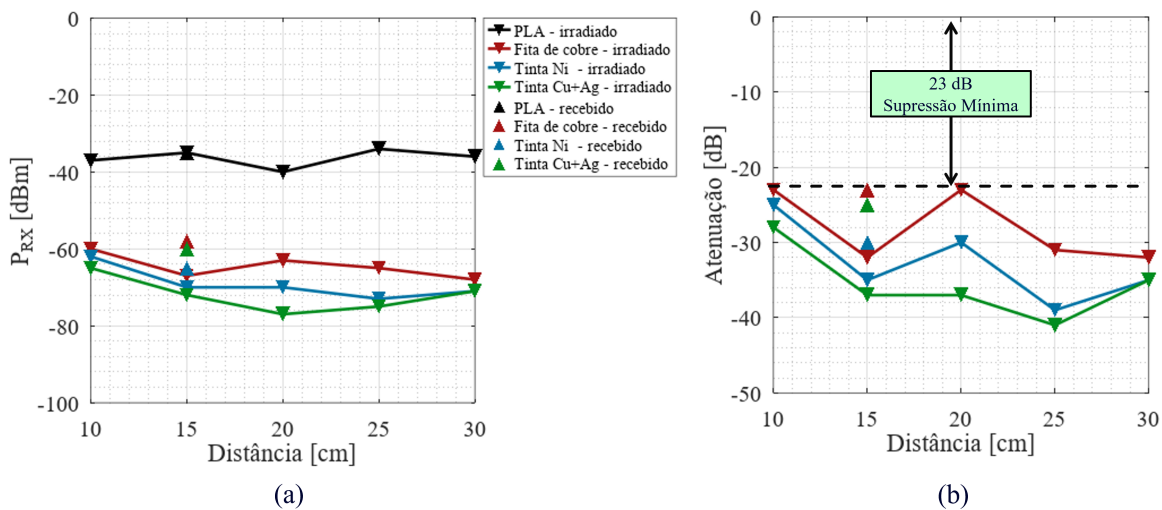


Fig. 4. Resultados obtidos nas medições de confinamento (▲), e blindagem (▼). (a) Valores absolutos de potência recebida. (b) Valores de atenuação com relação à amostra de PLA sem tratamento de superfície.

TABELA I
CUSTO ESTIMADO POR AMOSTRA NESTE TRABALHO.

Amostra	c_b	c_r	total
PLA		-	US\$ 3
Fita de Cobre	\$ 3	US\$ 1	US\$ 4
Tinta (Ni) 841AR		US\$ 15	US\$ 18
Tinta (Cu+Ag) 843AR		US\$ 16	US\$ 19

comparação entre os resultados, visando a reprodutibilidade dos experimentos. Tomando a área das amostras a receberem tratamento para imunidade eletromagnética, recorreu-se às especificações do fabricante para obter os dados de rendimento das tintas condutivas aplicadas neste trabalho [13], [14].

O rendimento é um parâmetro de manual e refere-se a área que é possível de ser coberta com uma lata do material. Levando-se em conta o volume contido em cada lata, para a tinta de níquel *MG Chemicals 841AR SUPER SHIELD*[®] [13] o fabricante especifica um rendimento de 250 000 mm² por lata. Dividindo este valor pela área de superfície tratada S , tem-se um total de 11,21 amostras cobertas com este material. A tinta de cobre revestido de prata *MG Chemicals 843AR SUPER SHIELD*[®] [14], apresenta rendimento declarado pelo fabricante aproximadamente 20% maior, de 310 000 mm². Portanto, este material permite o tratamento da superfície de aproximadamente 13,9 amostras.

Para dimensionar os custos associados, optou-se por levar em conta apenas a parte inteira do rendimento calculado, com 11 amostras para tinta de níquel (841AR) e 13 para a tinta de cobre revestido de prata (843AR). Também foi considerado o valor de cada lata, já incluídas as taxas e frete. Respectivamente, as tintas de níquel e cobre revestido de prata apresentaram custos de US\$ 160 e US\$ 177. Ademais, para o recobrimento em fita adesiva de cobre, o custo por amostra tratada é de aproximadamente US\$ 1, levando em conta que cada amostra consome aproximadamente 1.2 m de fita, e que o custo da fita é pouco menor que US\$ 1/m. Combinando estes valores aos rendimentos, tem-se o valor estimado por amostra dado pela Tabela I, em que se vê o custo base da peça em plástico, c_b , e o custo do recobrimento c_r . A composição final

do custo leva em conta o valor base da amostra, fabricado em termo-plástico (PLA), que é de aproximadamente US\$ 3 por caixa. De um modo geral, pode-se escrever o custo por amostra $c(US\$)$, por:

$$c(US\$) = c_b + int\left(\frac{R_m}{S}\right), \quad (4)$$

em que, c_b é o custo base da peça produzida por manufatura aditiva convencional, R_m é o rendimento do material de tratamento de superfície em mm², e S é a área da amostra, também em mm². De posse desta abordagem, é possível comparar os custos para outras possibilidades de tratamento, como por exemplo, ao se empregar o uso de latas de tintas ao invés de garrafas de spray, com custo substancialmente mais baixos por amostra. Os mesmos materiais utilizados nesta amostra, também são oferecidos em latas de 1 litro. Neste caso as tintas de níquel (841AR) e cobre revestido de prata (843AR) apresentam, respectivamente, custos aproximados de US\$ 682 e US\$ 756 por lata. No entanto envasados desta forma oferecem rendimentos de 2 392 000 mm², cobrindo um total de 91 amostras inteiras e 4 478 500 mm², cobrindo um total de 170 amostras. O custo por amostra resultante neste caso seria de aproximados US\$ 7 e US\$ 10 por caixa.

A Tabela II apresenta uma comparação entre os custos por amostra formulados de acordo com a abordagem apresentada. Para padronizar a análise e permitir comparações futuras, todos os valores estão apresentados em dólares (USD).

IV. CONCLUSÃO

Os resultados experimentais demonstraram que a combinação de manufatura aditiva com recobrimentos condutivos fornece níveis de efetividade de blindagem em torno de 30 dB na faixa de 2.4 GHz, tanto para contenção de irradiação interna quanto para rejeição de fontes externas. Esse patamar de atenuação é consistente com aplicações compactas que demandam mitigação prática de EMI sem recorrer a invólucros integralmente metálicos.

Sob a ótica de viabilidade, os dados de custo indicam que a solução proposta preserva competitividade mesmo utilizando

TABELA II
COMPOSIÇÃO DE CUSTO POR TIPO DE TRATAMENTO DE SUPERFÍCIE COMPARADAS COM OPÇÕES DISPONÍVEIS NO MERCADO.

Solução	Valor base	Tratamento Superficial	Custo por caixa
PLA sem cobertura	US\$ 3	–	US\$ 3
PLA + Fita metálica	US\$ 3	US\$ 1	US\$ 4
PLA + Níquel (aerossol)	US\$ 3	US\$ 15	US\$ 18
PLA + Cobre Revestido de Prata (aerossol)	US\$ 3	US\$ 16	US\$ 19
PLA + Cobre Revestido de Prata (Litro)	US\$ 3	US\$ 7	US\$ 10
PLA + Níquel (Litro)	US\$ 3	US\$ 4	US\$ 7
Impressão 3D em Al [24]	US\$ 48	–	US\$ 48
Equivalente metálica de prateleira 1 [25]	US\$ 43	–	US\$ 43
Equivalente metálica de prateleira 2 [26]	US\$ 42	–	US\$ 42

materiais de alto valor agregado (tintas ou fitas metálicas). Conforme a Tabela I, o custo total por caixa tratada situa-se tipicamente entre US\$4 (fita de cobre) e US\$19 (tintas em aerossol), a partir de um custo base de US\$3 do invólucro em PLA. Quando se adota suprimentos em maior volume (lata líquida), a Tabela II mostra reduções adicionais, com custos por unidade próximos de US\$7 ~ US\$10, à medida que o rendimento por embalagem aumenta.

Quando comparados a alternativas metálicas usuais, o diferencial econômico torna-se evidente: valores de referência de mercado para peças metálicas equivalentes ou impressão 3D em metal permanecem substancialmente acima do intervalo de custos obtido com impressão 3D polimérica seguida de recobrimento (Tabela II). Assim, mesmo considerando o preço mais elevado dos materiais condutivos, o custo total por unidade se mantém inferior em cenários de baixa e média escala, especialmente quando múltiplas amostras são tratadas em um mesmo lote.

Adicionalmente, a manufatura aditiva desacopla o custo da complexidade geométrica, permitindo projetar invólucros com formas ergonômicas e passagens funcionais sem penalidades proporcionais, ao passo que a manufatura subtrativa e soluções metálicas tendem a encarecer com complexidade e ferramental. Em conjunto, o desempenho da Efetividade de Blindagem observado e a estrutura de custos apresentada confirmam a estratégia de utilizar impressão 3D associada a recobrimento condutivo é uma alternativa tecnicamente eficaz e economicamente vantajosa para aplicações que requerem imunidade eletromagnética em baixa e média escala de produção.

ACKNOWLEDGEMENTS

Devido a restrições de conformidade e de propriedade intelectual, este trabalho não divulga a aplicação final específica do método proposto. O escopo desta publicação limita-se ao objetivo genérico de conferir alta imunidade eletromagnética a dispositivos cujos invólucros possuem função geométrica e ergonômica relevante. As informações sobre materiais, dimensões e procedimentos de teste são apresentadas apenas na medida necessária para assegurar a reprodutibilidade científica do conceito, sem revelar detalhes proprietários de implementação. Um pedido de patente relacionado a esta tecnologia foi depositado.

Para a análise de custos, todos os valores monetários foram padronizados em dólares americanos (USD). Insumos cotados originalmente em moeda nacional foram convertidos para USD utilizando a taxa de câmbio de março de 2026, na proporção de 1:6 (BRL:USD), aplicada uniformemente em todas as estimativas e comparações apresentadas. Essa padronização visa permitir comparabilidade entre soluções e fornecedores, independentemente da origem dos materiais e do volume de aquisição.

Os autores agradecem ao laboratório de desenvolvimento de hardware do FIT, em Sorocaba-SP, pelo suporte fornecido, incluindo infraestrutura, materiais e ferramentas que viabilizaram a execução dos experimentos e a consolidação dos resultados aqui apresentados.

REFERÊNCIAS

- [1] Filip Valjak, Dora Kosorčić, Marija Rešetar, and Nenad Bojčetić. Function-based design principles for additive manufacturing. *Applied Sciences*, 12(7):3300, 2022.
- [2] Amirjalal Jalali, Ruiyan Zhang, Reza Rahmati, Mohammadreza Nofar, Mohini Sain, and Chul B Park. Recent progress and perspective in additive manufacturing of emi shielding functional polymer nanocomposites. *Nano Research*, 16(1):1–17, 2023.
- [3] Gregory-Jamie Tüzün, Daniel Roth, and Matthias Kreimeyer. Function integration in additive manufacturing: a review of approaches. *Proceedings of the Design Society*, 3:2005–2014, 2023.
- [4] Guanhua Zhang, Haipeng Wang, Wei Xie, Siyuan Zhou, Zeqi Nie, Gilbert Niwamanya, Zhihui Zhao, and Huigao Duan. Advancements in 3d-printed architectures for electromagnetic interference shields. *Journal of Materials Chemistry A*, 12(10):5581–5605, 2024.
- [5] Raheel Abbas, Ubaid ur Rehman, Numrah Sultan, Uzma Ghazanfar, Tahir Ali, Muhammad Nadeem, et al. 3d printed lightweight honeycomb vent structures with subsequent coating of silver nanowires for efficient electromagnetic interference (emi) shielding. *Heliyon*, 10(9), 2024.
- [6] Academy of EMC. Shielding: Theory, slots and apertures, near/far field, 2026. Teoria de blindagem, efeito de fendas/aberturas e definição de SE.
- [7] Amirjalal Jalali, Ruiyan Zhang, Reza Rahmati, Mohammadreza Nofar, Mohini Sain, and Chul B Park. Recent progress and perspective in additive manufacturing of emi shielding functional polymer nanocomposites. *Nano Research*, 16(1):1–17, 2023.
- [8] Z Viskadourakis, KC Vasilopoulos, EN Economou, Costas M Soukoulis, and G Kenanakis. Electromagnetic shielding effectiveness of 3d printed polymer composites. *Applied Physics A*, 123(12):736, 2017.
- [9] MG Chemicals. Conductive paints – catalogue, 2026. Catálogo de tintas condutivas com pigmentos (grafite, níquel, prata/cobre, prata).
- [10] Douglas S. Thomas and Stanley W. Gilbert. Costs and cost effectiveness of additive manufacturing: A literature review and discussion. Technical Report NIST Special Publication 1176, National Institute of Standards and Technology, 2014.
- [11] Engineering LibreTexts. Cost analysis of traditional manufacturing vs. additive manufacturing methods, 2026. Discussão de estrutura de custos, sensibilidade a volume e complexidade.
- [12] Murray R Spiegel. Handbook of mathematical formulas. *New York, USA: Schaum-McGraw Hill*, 1968.
- [13] MG Chemicals. *Technical Data Sheet - 841AR Super Shield Nickel Conductive Coating*, 2024. Accessed: 2026-03-17.
- [14] MG Chemicals. *Technical Data Sheet - 843AR Super Shield Copper Conductive Coating*, 2024. Accessed: 2026-03-17.
- [15] 3M. 3m™ emi absorber ab700 series. https://www.3mcanada.ca/3M/en_CA/p/d/v000062609/, 2026. Accessed: 2026-03-19.
- [16] Constantine A Balanis. *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley & sons, 2016.
- [17] Nordic Semiconductor. *nRF52840 Product Specification*, 2024. Datasheet / Product Specification.
- [18] Motorola Mobility LLC. Moto g84 5g – product page. <https://www.motorola.com/we/en/p/phones/moto-g/84-5g/pmipmgf35mx>, 2026. Accessed: 2026-03-19.
- [19] Nordic Semiconductor ASA. nrf connect for mobile. <https://www.nordicsemi.com/Products/Development-tools/nRF-Connect-for-mobile>, 2026. Accessed: 2026-03-19.
- [20] Bluetooth Special Interest Group. Bluetooth core specification, 2023. Accessed: 2026-08-05.
- [21] MPB Electronic. Shielding effectiveness test: Ieee std 299 and electromagnetic attenuation, 2026. Discussão prática de SE em dB e referência a IEEE Std 299.
- [22] Agilent Technologies, Inc. *N5183A MXG Microwave Analog Signal Generator: Data Sheet*. Agilent Technologies, USA, rev. e edition, December 2013. Published: 2013-12-18. Accessed: 2026-03-17.
- [23] Keysight Technologies. *N9000A CXA X-Series Signal Analyzer: Technical Data*. Keysight Technologies, USA, rev. en edition, April 2018. Published: 2018-04-09. Accessed: 2026-03-17.
- [24] PCBWay. Pcbway rapid prototyping and manufacturing services, 2026. Accessed: 2026-03-23.
- [25] MG Chemicals. *841AR Liquid Super Shield Nickel Conductive Paint Technical Data Sheet*. MG Chemicals, 1210 Corporate Drive, Burlington, Ontario, Canada L7L 5R6, August 2025. ISO 9001:2015 Quality Management System, SAI Global File: 004008.
- [26] MG Chemicals. *843AR Liquid Super Shield Silver-Coated Copper Conductive Paint Technical Data Sheet*. MG Chemicals, 1210 Corporate Drive, Burlington, Ontario, Canada L7L 5R6, February 2026. ISO 9001:2015 Quality Management System, SAI Global File: 004008.