



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**

Faculdade de Engenharia de São João da Boa Vista

Luís Henrique de Faria Oraggio

**Fabricação de Antenas Helicoidais por
Manufatura Aditiva de Polímeros com
Metalização por Tinta Condutiva**

São João da Boa Vista

2025

Luís Henrique de Faria Oraggio

Fabricação de Antenas Helicoidais por Manufatura Aditiva de Polímeros com Metalização por Tinta Condutiva

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Conselho de Curso de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações da Faculdade de Engenharia de São João da Boa Vista, Universidade Estadual Paulista, como requisito parcial para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Abrantes Penchel

São João da Boa Vista

2025

O63f

Oraggio, Luís Henrique de Faria

Fabricação de antenas helicoidais por manufatura aditiva de polímeros com metalização por tinta condutiva / Luís Henrique de Faria Oraggio. -- São João da Boa Vista, 2025

61 p. : il., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Telecomunicações) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista

Orientador: Rafael Abrantes Penchel

1. Engenharia elétrica. 2. Telecomunicações. 3. Antenas (Eletronica). 4. Manufatura aditiva. 5. Impressão tridimensional. I. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**FABRICAÇÃO DE ANTENAS HELICOIDAIS POR MANUFATURA ADITIVA COM
METALIZAÇÃO POR TINTAS CONDUTIVAS**

Aluno: Luis Henrique de Faria Oraggio
Orientador: Prof. Dr. Rafael Abrantes Penchel

Banca Examinadora:

- Rafael Abrantes Penchel (Orientador)
- Mirian Paula dos Santos (Examinadora)
- Eligia Simionato (Examinadora)

Os formulários de avaliação e a ata da defesa, na qual consta a aprovação do trabalho, devidamente assinados pela banca encontram-se no prontuário eletrônico do aluno.

São João da Boa Vista, 09 de dezembro de 2025

Agradecimentos

Ao meu pai, Luís Henrique Oraggio, à minha mãe, Brigitte de Faria Fontes Leite, e ao meu padrasto, João Paulo Ferreira Leite, por terem moldado grande parte de quem sou hoje, por darem todo o apoio, ensinamentos, incentivos e estrutura ao longo da minha formação, e por sempre acreditarem em mim.

Aos meus irmãos por sempre proporcionarem bons momentos, e em especial ao meu irmão Gabriel de Faria Oraggio, meu companheiro de vida no dia a dia, mesmo quando distante.

Aos meus amigos e à minha família por ajudarem a aliviar minha mente em momentos difíceis, e em especial ao meu primo Gustavo de Faria Fontes pela amizade, conversas e momentos de descontração que tornam os dias mais leves.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rafael Abrantes Penchel, pelos direcionamentos e pela paciência durante o desenvolvimento deste trabalho.

À Dra. Mirian Paula dos Santos, pelo apoio nas atividades experimentais, pelos *feedbacks*, pelas motivações e por sua postura sempre acolhedora, inteligente e generosa.

Ao técnico do laboratório de materiais, Luis Gustavo Cordioli Russi, pelas instruções e ensinamentos sobre os parâmetros e particularidades da impressão 3D no início das etapas experimentais.

Agradeço a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para minha evolução pessoal e para a conclusão deste trabalho.

Muito obrigado!

Resumo

Este trabalho avalia experimentalmente a viabilidade da fabricação de antenas helicoidais com ângulo de *pitch* não uniforme por meio da manufatura aditiva de impressão 3D em FDM (Modelagem por Deposição Fundida), utilizando o polímero ácido polilático (PLA), e a posterior metalização de suas superfícies por aplicação de tinta condutiva à base de flocos de cobre revestidos com prata. O método proposto busca representar uma alternativa de maior acessibilidade e menor custo em comparação a processos de manufatura de nível industrial de elevada precisão dimensional e alto custo associado, como a manufatura aditiva metálica, para a produção desse tipo de antena helicoidal de geometria complexa não uniforme. A metodologia adotada envolveu a reprodução física de três modelos de antenas helicoidais originados do trabalho de referência, a otimização dos parâmetros de impressão 3D por meio de sucessivas iterações até que se obtivessem amostras com integridade estrutural satisfatória, a aplicação manual da tinta condutiva e a caracterização eletromagnética das amostras por meio de medições da magnitude do coeficiente de reflexão ($|S_{11}|$). Os resultados foram comparados às respostas da simulação e às curvas obtidas para antenas produzidas por técnicas de maior precisão dimensional, que incluem sinterização seletiva a laser e manufatura aditiva metálica. As amostras produzidas neste trabalho alcançaram resultados satisfatórios de impressão e construção, além de curvas de $|S_{11}|$ próximas às das antenas metálicas de referência, embora levemente inferiores devido às limitações intrínsecas do método FDM e da aplicação manual da tinta. Os resultados evidenciam que o método proposto constitui uma alternativa viável, de maior disponibilidade, de baixo custo e compatível com prototipagem, fabricação e estudo experimental de antenas que apresentam geometrias complexas, sendo especialmente útil em ambientes acadêmicos, didáticos e de pesquisa.

Palavras-chave: antena helicoidal; ângulo de *pitch* não uniforme; manufatura aditiva; impressão 3D FDM; tinta condutiva.

Abstract

This work experimentally evaluates the feasibility of fabricating helical antennas with non-uniform pitch angle through additive manufacturing using Fused Deposition Modeling (FDM) 3D printing with polylactic acid (PLA) polymer, followed by surface metallization by applying a conductive paint composed of silver-coated copper flakes. The proposed method aims to represent an alternative with greater accessibility and lower cost compared to industrial-grade manufacturing processes that offer high dimensional precision but are associated with high costs, such as metal additive manufacturing, for the production of this type of helical antenna with non-uniform complex geometry. The methodology adopted involved the physical reproduction of three helical antenna models originating from the reference work, the optimization of 3D printing parameters through successive iterations until samples with satisfactory structural integrity were obtained, the manual application of the conductive paint, and the electromagnetic characterization of the samples through measurements of the magnitude of the reflection coefficient ($|S_{11}|$). The results were compared with the simulated responses and with the curves obtained for antennas produced by higher-precision manufacturing techniques, including selective laser sintering and metal additive manufacturing. The samples produced in this work achieved satisfactory printing and construction results, as well as $|S_{11}|$ curves close to those of the metallic reference antennas, although slightly inferior due to intrinsic limitations of the FDM method and the manual paint application. The results demonstrate that the proposed method constitutes a viable, widely accessible, and low-cost alternative compatible with the prototyping, fabrication, and experimental study of antennas with complex geometries, being particularly useful in academic, educational, and research environments.

Keywords: helical antenna; non-uniform pitch angle; additive manufacturing; FDM 3D printing; conductive paint.

Lista de ilustrações

Figura 1 — Estrutura Geral e Relação entre Parâmetros de uma Antena Helicoidal.	18
Figura 2 — Modelos das Antenas Helicoidais Adotadas.	19
Figura 3 — Materiais utilizados para os testes iniciais com a tinta condutiva. . . .	25
Figura 4 — Observação em Microscópio de uma Lasca Curada da Tinta Condutiva.	26
Figura 5 — Camada de Tinta Condutiva em Contato com o PLA.	27
Figura 6 — Impressora 3D e Acessórios Utilizados em Laboratório.	28
Figura 7 — Aplicação de Tinta Condutiva na Antena Obtida.	30
Figura 8 — Processo de Metalização Simultânea das Antenas Produzidas por SLS.	32
Figura 9 — Primeiros Registros de Mudanças de Configuração.	33
Figura 10 — Registros das Modificações de Configuração entre Iterações.	33
Figura 11 — Geração de Suporte do Tipo <i>Snug</i> no <i>Software</i> de Fatiamento.	35
Figura 12 — Antena de Modelo II Orientada em 180° com <i>Raft</i> e Suporte <i>Snug</i> . . .	36
Figura 13 — Medição das Antenas em Laboratório.	36
Figura 14 — Primeira Antena de Impressão Completa.	38
Figura 15 — Resultados Iniciais de Variações de Impressão na Horizontal.	38
Figura 16 — Melhor Resultado de Impressão na Horizontal.	39
Figura 17 — Resultados da Utilização do Suporte em Árvore.	39
Figura 18 — Montagem da Primeira Antena.	40
Figura 19 — Resultado da Antena de Teste.	41
Figura 20 — Primeira Medição no Analisador de Espectro.	41
Figura 21 — Antenas Produzidas por SLS Devidamente Montadas.	42
Figura 22 — Processo de Impressão com Poucas Iterações de Parâmetros.	43
Figura 23 — Impressão Após as Iterações Iniciais.	43
Figura 24 — Resultados Finais de Impressão para Antenas de Modelo III.	44
Figura 25 — Antena de Tipo II e seus Restos de Suporte.	45
Figura 26 — Remoção do Suporte <i>Snug</i>	45
Figura 27 — Montagem de Antenas de Modelos II e III.	46
Figura 28 — Evolução da Qualidade de Impressão das Antenas.	47
Figura 29 — Modelo I - Curvas de Referência.	48
Figura 30 — Modelo I - Curvas das Medições de $ S_{11} $ em Laboratório.	48
Figura 31 — Modelo II - Curvas de Referência.	49
Figura 32 — Modelo II - Curvas das Medições de $ S_{11} $ em Laboratório.	49
Figura 33 — Modelo III - Curvas de Referência.	50
Figura 34 — Modelo III - Curvas das Medições de $ S_{11} $ das Amostras Produzidas por SLS.	51

Figura 35 — Modelo III - Curvas das Medições de $ S_{11} $ das Amostras Produzidas por FDM.	51
--	----

Lista de abreviaturas e siglas

UNESP	Universidade Estadual Paulista
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
PLA	Ácido Polilático (<i>Polylactic Acid</i>)
FDM	Modelagem por Deposição Fundida (<i>Fused Deposition Modeling</i>)
SLS	Sinterização Seletiva a Laser (<i>Selective Laser Sintering</i>)
FLP-L	Fusão em Leito de Pó a Laser
SMA	SubMiniature version A
RF	Radiofrequência

Lista de símbolos

S	Espaçamento entre as espiras
D	Diâmetro da hélice
C	Circunferência da hélice
L	Comprimento de uma espira
α	Ângulo de <i>pitch</i> da antena
μ	Micro
GHz	Gigahertz
mm/s	Milímetros por segundo

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Motivação e Justificativa	15
1.2	Objetivos	15
1.2.1	Objetivo Geral	15
1.2.2	Objetivos Específicos	16
2	CONTEXTUALIZAÇÃO TÉCNICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Antenas Helicoidais	17
2.1.1	Geometria das Antenas Helicoidais e Parâmetros Relevantes	17
2.1.2	Antenas Helicoidais com Ângulo de <i>Pitch</i> Não Uniforme	18
2.1.3	Modelos Adotados para Este Trabalho	18
2.2	Técnicas de Manufatura Aditiva	19
2.2.1	Manufatura Aditiva de Metais por Fusão em Leito de Pó a Laser	20
2.2.2	Sinterização Seletiva a Laser	20
2.2.3	Deposição de Filamento Fundido	21
2.2.3.1	<i>Polímero PLA na Impressão FDM</i>	22
2.3	Metalização de Superfícies	22
3	METODOLOGIA	24
3.1	Escolha e Obtenção dos Materiais e Métodos	24
3.1.1	Testes Iniciais com a Tinta Condutiva	25
3.1.2	Observação da Espessura da Camada de Tinta	26
3.1.3	Método de Aplicação	27
3.2	Processo de Manufatura das Antenas Helicoidais	28
3.2.1	Estratégias Iniciais de Impressão	28
3.2.2	Tentativas de Impressão com as Antenas na Horizontal	29
3.2.3	Otimização de Impressões na Vertical	29
3.2.4	Metalização de Superfície e Construção da Primeira Antena	30
3.2.5	Medição da Primeira Antena Completa	31
3.2.6	Antenas Produzidas por Manufatura SLS	31
3.2.7	Busca pela Otimização da Qualidade de Impressão das Antenas de Modelo III	31
3.2.8	Soluções de Viabilização de Impressão para as Antenas de Modelo I e II	34
3.2.8.1	<i>Análises para Encontrar o Tipo de Suporte Adequado</i>	34
3.2.8.2	<i>Rotação em 180° na Orientação de Impressão das Antenas de Modelos I e II</i>	34
3.2.9	Consolidação dos Parâmetros de Impressão e Construção das Antenas	35

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
4.1	Resultados Iniciais de Impressão das Antenas na Vertical	37
4.1.1	Resultados da Impressão das Antenas na Horizontal	37
4.1.2	Otimização da Impressão de Antenas na Vertical com a Utilização de Suportes	39
4.1.3	Montagem da Primeira Antena Completa	40
4.1.4	Resultados da Primeira Medição	41
4.2	Montagem das Antenas Produzidas por SLS	42
4.3	Resultados da Segunda Etapa de Otimização de Impressão das Antenas Helicoidais	42
4.3.1	Otimização de Impressão das Antenas de Modelo III	42
4.3.2	Soluções de Impressão das Antenas de Modelos I e II	44
4.4	Qualidade Final da Impressão FDM Obtida para as Antenas	46
4.5	Resultados das Medições de Caracterização pela Magnitude do Coeficiente de Reflexão	47
4.5.1	Antenas de Modelo I	47
4.5.2	Antenas de Modelo II	49
4.5.3	Antenas de Modelo III	50
4.6	Comparação entre os Métodos de Manufatura Testados	51
4.7	Considerações Finais sobre os Resultados	52
5	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS	55
	APÊNDICE — A CONFIGURAÇÕES FINAIS DE IMPRESSÃO.	57
	ANEXO — A FICHA TÉCNICA DA TINTA CONDUTIVA.	61

1 Introdução

É evidente a evolução sistêmica no campo das telecomunicações nos últimos anos, assim como seu papel fundamental na conectividade e no desenvolvimento econômico global (OLADELE, 2024). Para tanto, à medida que a demanda por conexões cada vez mais rápidas, eficientes e estáveis aumenta exponencialmente, faz-se necessário que haja buscas constantes por inovações capazes de atender as especificações necessárias que tornam possível a otimização dos sistemas de comunicação. Levando isso em consideração, as antenas helicoidais se destacam não só como um tipo de antena consolidada amplamente utilizada, mas também pelo grande potencial de modificação de sua configuração física para atender às diferentes aplicações (BALANIS, 2005).

As antenas helicoidais são antenas de fácil construção, cujo funcionamento se baseia na propagação de ondas eletromagnéticas ao longo de uma hélice, e possuem como grande destaque a capacidade de produzir ondas circularmente polarizadas (KRAUS; WILLIAMSON, 1948), oferecendo vantagens em uma grande variedade de situações. Suas principais aplicações estão nos setores de comunicações via satélite (LAQUERBE; FRAGNIER, 2022), radioastronomia, sistemas de radar e sistemas de comunicação, como em comunicações móveis, redes *wireless* e outros sistemas de comunicação terrestre, devido à sua capacidade de operar com um tamanho compacto e em uma ampla faixa de frequências. Além disso, pode operar em diferentes modos de propagação, apresentando um padrão de radiação axial ou omnidirecional, a depender do design (KRAUS, 1949).

Dadas as suas particularidades, fica evidente a importância da antena helicoidal no mundo das telecomunicações. Sua singularidade se dá pela sua geometria helicoidal, a qual permite grande flexibilidade em seu design, podendo ter seus parâmetros físicos ajustados de modo a atender às performances de radiação desejadas para projetos com objetivos distintos, seja com foco na diretividade, na largura de banda ou em um equilíbrio entre elas (LALLI, 2021). Assim sendo, há diversos projetos de antenas helicoidais para diferentes aplicações.

À medida que os dispositivos utilizados hoje evoluem a cada ano, tornando-se menores, mais presentes no dia a dia das pessoas e possuindo maior capacidade de processamento, faz-se necessário que os sistemas de telecomunicação sejam adaptados de forma a acompanhar essa evolução. Com isso, há uma busca por antenas cada vez menores, mais leves e com características de radiação otimizadas (VOLAKIS, 2007). Uma alternativa adicional para as antenas helicoidais, que já são muito flexíveis quanto ao seu design (KRAUS, 1949; BALANIS, 2005; MILLIGAN, 2005), é utilizar uma técnica que visa não apenas determinar novos valores fixos para os parâmetros físicos, como o

diâmetro, o espaço entre as espiras e o número de espiras, mas sim variá-los de maneira não linear, fazendo com que o projeto apresente um ângulo de *pitch* não uniforme. Esta técnica, estudada em Lalli (2021), pode apresentar um aumento no ganho ou alargamento da faixa de frequências em que a antena é capaz de operar de maneira eficiente, a fim de estabelecer o equilíbrio desejado entre ambos, dependendo do projeto.

A utilização da técnica de projetar uma antena helicoidal com um ângulo de *pitch* não uniforme é uma alternativa que garante benefícios à eficiência espectral da antena (MENON.A; S, 2011; LALLI, 2021; PENCHEL *et al.*, 2024). Porém, ela muitas vezes torna a geometria da hélice complexa. A espiral helicoidal passa a ser refinada e adaptada de maneiras que trazem desafios na etapa de fabricação desse tipo de antena que, normalmente, em configurações convencionais, com um ângulo de *pitch* uniforme, se destaca por ser de fabricação simples. Portanto, para que a melhoria seja possível, são necessários novos métodos que viabilizem a produção desse tipo de antena com geometrias mais complexas.

Nesse cenário, a manufatura aditiva surge como uma alternativa capaz de viabilizar a fabricação dessas antenas devido à sua natureza de construção de peças camada a camada, apresentando maior personalização pela liberdade geométrica que oferece e, ainda, com menor desperdício de material quando comparada à métodos de manufatura subtrativa.

No artigo de referência deste trabalho (PENCHEL *et al.*, 2024), foi utilizada a técnica de manufatura aditiva de metais por Fusão em Leito de Pó a Laser (FLP-L) para a produção das antenas helicoidais com ângulo de *pitch* não uniforme. Esse processo apresenta alta precisão dimensional, o que resultou em antenas metálicas com desempenho eletromagnético compatível com a simulação. Entretanto, seu custo elevado, a dependência de equipamentos de nível industrial e o acesso limitado podem dificultar sua aplicação em projetos de pesquisa e acadêmicos.

Diante dessas limitações, tornam-se relevantes a busca e o estudo experimental de métodos mais acessíveis que permitam reproduzir a geometria complexa dessas antenas com desempenho eletromagnético funcional adequado. Perante esse contexto, a impressão 3D por deposição de filamento fundido (FDM) atrelada a metalização da superfície polimérica por tinta condutiva representa uma solução promissora. A impressão 3D por FDM possui maior acessibilidade, estando mais disponível a cada dia em diversos ambientes, incluindo acadêmicos e até mesmo domésticos, e é capaz de viabilizar a reprodução de protótipos e peças com baixo custo e rapidez. Contudo, exige uma etapa de metalização para a finalidade estudada.

Dessa forma, este trabalho propõe a avaliação experimental dessa abordagem para fabricar antenas helicoidais com ângulo de *pitch* não uniforme, investigando a qualidade estrutural das amostras obtidas e seu desempenho eletromagnético em comparação com amostras produzidas por técnicas de precisão dimensional superior.

1.1 Motivação e Justificativa

A geometria das antenas helicoidais com ângulo de pitch não uniforme oferece vantagens relevantes em aplicações de telecomunicações (MENON.A; S, 2011; LALLI, 2021; PENCHEL *et al.*, 2024), como a ampliação da largura de banda de operação e a otimização de características de irradiação. Contudo, essas melhorias vêm acompanhadas de um aumento na complexidade geométrica da antena, o que torna sua fabricação por métodos convencionais difícil ou inviável.

No trabalho de referência (PENCHEL *et al.*, 2024), as antenas foram produzidas por manufatura aditiva de metal, um método de alta precisão, porém de custo elevado e que depende de equipamentos de nível industrial, o que inviabiliza sua disponibilidade em ambientes como os de pesquisa acadêmica ou em laboratórios didáticos. Essas limitações evidenciam a necessidade de buscar alternativas acessíveis para prototipagem, estudo e fabricação de antenas de geometrias avançadas.

Nesse cenário, a impressão 3D por FDM surge como uma possível solução de baixo custo, com ampla disponibilidade e capacidade para reproduzir estruturas complexas. No entanto, apresenta menor precisão dimensional intrínseca e requer um processo de metalização, neste caso, por aplicação de tinta condutiva, para adquirir as propriedades eletromagnéticas características de uma antena.

Dessa forma, este trabalho se justifica pela necessidade de avaliar experimentalmente a viabilidade dessa abordagem, verificando se as antenas helicoidais de geometria complexa podem ser efetivamente fabricadas por impressão 3D FDM e metalização com tinta condutiva, e em que medida seu desempenho é compatível com o obtido por métodos de manufatura de maior precisão. Além disso, a validação dessa abordagem pode contribuir para alternativas de fabricação e prototipagem mais acessíveis e de baixo custo, vantagens especialmente úteis em ambientes de ensino e pesquisa.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar experimentalmente a viabilidade de fabricar antenas helicoidais de geometria não uniforme por meio de impressão 3D FDM e metalização da superfície do polímero com tinta condutiva, verificando o desempenho das amostras através de medições da magnitude do coeficiente de reflexão ($|S_{11}|$) e comparando-as com os modelos de referência.

1.2.2 Objetivos Específicos

A fim de alcançar o objetivo geral deste trabalho de forma estruturada, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Reproduzir fisicamente os três modelos de antenas propostos, obtendo impressões completas para cada um deles.
- Definir e validar um método de aplicação da tinta condutiva para a metalização das antenas, priorizando uma boa uniformidade da camada de tinta, perdas mínimas de material e facilidade de aplicação.
- Desenvolver um conjunto otimizado de configurações de impressão que permita obter repetibilidade, qualidade superficial satisfatória, facilidade de remoção de suportes e mínimas perdas de material.
- Realizar medições experimentais do parâmetro $|S_{11}|$ para cada modelo proposto, incluindo amostras obtidas por diferentes métodos de manufatura.
- Avaliar o desempenho eletromagnético das antenas fabricadas por FDM, comparando seus resultados com aqueles obtidos para as antenas produzidas por sinterização seletiva a laser (SLS), por manufatura aditiva de metal e com a simulação obtida da referência (PENCHEL *et al.*, 2024).

2 Contextualização Técnica e Fundamentação Teórica

2.1 Antenas Helicoidais

As antenas helicoidais constituem uma classe de antenas amplamente estudada e utilizada desde sua introdução por Kraus no final da década de 1940 (KRAUS; WILLIAMSON, 1948). Isso se dá devido às suas características únicas, que garantem vantagens como flexibilidade de *design*, dimensões reduzidas, polarização circular de geração simples e capacidade de operar em amplas faixas de frequência. A antena helicoidal tem sua estrutura básica composta por um fio condutor enrolado em formato de hélice, com sua base fixada sobre um plano de terra e alimentada por um cabo coaxial, sendo que suas características de radiação dependem fortemente de sua geometria (BALANIS, 2005).

A polarização circular é desejável, pois elimina a necessidade de ajuste da polarização das antenas do sistema, como acontece no caso de antenas linearmente polarizadas, sendo vantajosa em cenários nos quais há objetos em movimento e com rotação variável (BALANIS, 2005), como nas comunicações móveis e satélites.

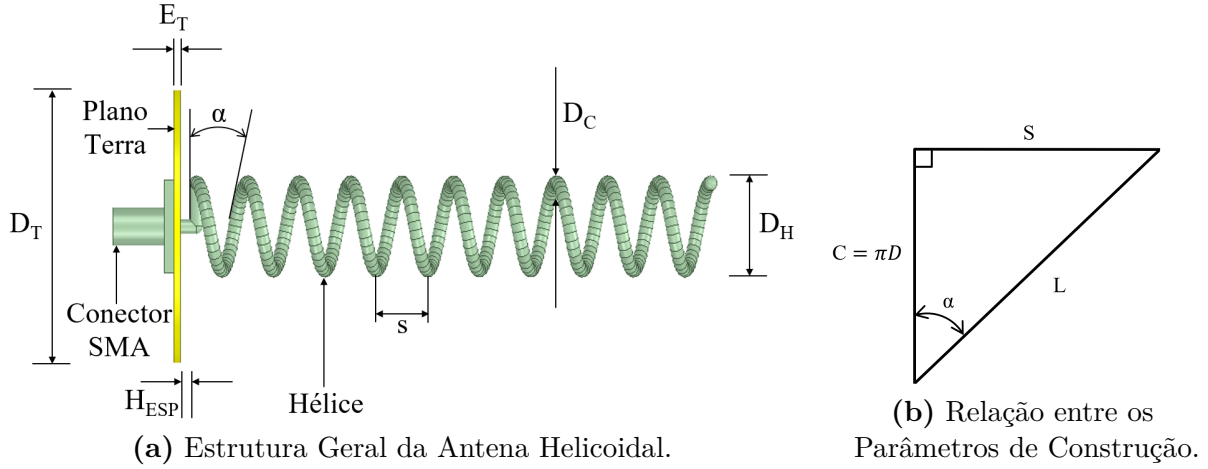
Segundo Kraus e Williamson (1948), as antenas helicoidais possuem, essencialmente, dois modos de operação: o modo normal e o modo axial. No modo normal, que ocorre quando as dimensões da hélice são muito menores que o comprimento de onda (assemelhando-se a uma pequena bobina ou a um dipolo curto), o campo irradiado apresenta valores máximos de propagação em direção perpendicular ao eixo longitudinal da antena, com padrão omnidirecional. Nesse modo de operação, devido às pequenas dimensões, as antenas apresentam ganho reduzido e largura de banda estreita, sendo pouco utilizadas (BALANIS, 2005). Em contraste, no modo axial, o feixe principal é irradiado ao longo do eixo da antena, com diretividade elevada e polarização circular. Isso torna as antenas helicoidais operantes no modo axial muito utilizadas em sistemas de telecomunicações de médias e longas distâncias, especialmente em aplicações aeroespaciais, como satélites e radioastronomia.

2.1.1 Geometria das Antenas Helicoidais e Parâmetros Relevantes

Como mencionado, as características de radiação de uma antena helicoidal estão diretamente associadas à sua geometria. A Figura 1 ilustra a estrutura da antena helicoidal e as relações geométricas entre seus parâmetros de construção. Nota-se que o passo da hélice (S), correspondente ao espaçamento entre as espiras, e a circunferência da hélice (C), definem o comprimento de uma espira (L). Essas grandezas constituem o ângulo de

pitch (α), parâmetro fundamental no comportamento da antena.

Figura 1 — Estrutura Geral e Relação entre Parâmetros de uma Antena Helicoidal.



Fonte: Lalli (2021).

As definições dimensionais no design da antena helicoidal, juntamente com o número de espiras na estrutura, influenciam diretamente as características de irradiação da antena projetada (MILLIGAN, 2005), como a frequência de operação, o casamento de impedâncias, o ganho, a diretividade, a largura de feixe e a polarização (LALLI, 2021). Esse comportamento reforça a necessidade de precisão dimensional no processo de fabricação.

2.1.2 Antenas Helicoidais com Ângulo de *Pitch* Não Uniforme

Embora existam arranjos de antenas helicoidais que são capazes de fornecer vantagens na performance eletromagnética, como configurações bifilares ou quadrifilares que podem oferecer melhorias em ganho ou largura de banda, essas abordagens trazem consigo uma maior complexidade de alimentação e aumentam o custo de fabricação. Alternativamente, pesquisas recentes indicam que a variação adequada do ângulo de *pitch* das antenas helicoidais monofilares pode otimizar suas características de radiação (MENON.A; S, 2011; LALLI, 2021; PENCHEL *et al.*, 2024).

Como demonstrado por Lalli (2021), a modulação dos parâmetros que constituem o ângulo de *pitch* permite projetar antenas com resultados que evidenciam um comportamento eletromagnético aprimorado, ampliando a largura de banda útil de operação. Em alguns casos, no entanto, as otimizações resultaram em detrimento da diretividade, o que demonstra a necessidade de encontrar o equilíbrio adequado entre os parâmetros para atender às metas de cada projeto.

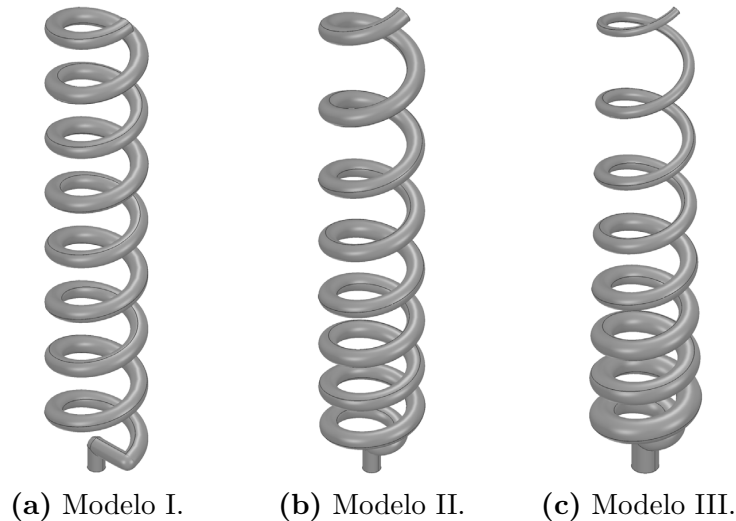
2.1.3 Modelos Adotados para Este Trabalho

Os três modelos de antenas helicoidais estudados neste trabalho foram originalmente idealizados em (LALLI, 2021) e, posteriormente, fabricados por manufatura aditiva de

metais e caracterizados no artigo de referência (PENCHEL *et al.*, 2024). Os modelos foram projetados para operação na Banda X (compreendida entre 8 GHz e 12 GHz) e apresentam oito espiras em sua estrutura, com apenas 6,4 centímetros de altura, sendo que cada modelo apresenta uma diferenciação geométrica em seus parâmetros de construção:

- Modelo I: Antena helicoidal convencional com diâmetro e espaçamento entre espiras uniformes.
- Modelo II: Antena helicoidal com diâmetro e espaçamento entre espiras não uniformes.
- Modelo III: Antena helicoidal com diâmetro, seção transversal e espaçamento entre espiras não uniformes, apresentando afinamento progressivo ao longo da estrutura.

Figura 2 — Modelos das Antenas Helicoidais Adotadas.



Fonte: Penchel *et al.* (2024).

A escolha dessas três antenas, apresentadas na Figura 2, ocorreu pela disponibilidade das amostras metálicas produzidas no trabalho de referência (PENCHEL *et al.*, 2024), o que viabiliza uma comparação direta com os resultados obtidos neste trabalho. Além disso, a complexidade geométrica dos modelos constitui um grande desafio para a impressão 3D em FDM, representando um cenário ideal para avaliar a capacidade e o desempenho desse método de fabricação. Dessa forma, este trabalho concentra-se em investigar experimentalmente a viabilidade dessa metodologia aplicada à estes três modelos de antenas.

2.2 Técnicas de Manufatura Aditiva

Enquanto métodos convencionais de fabricação, como usinagem, conformação de fios de metal ou utilização de moldes dedicados, são adequados para produzir objetos

helicoidais de geometria uniforme, eles se tornam limitados, caros ou inviáveis quando se deseja produzir perfis variáveis ou formas mais complexas, como as que constituem as antenas helicoidais com ângulo de *pitch* não uniforme. Além disso, esses métodos dependem de ferramentas específicas e podem gerar altos desperdícios de matéria-prima, resultando em um maior impacto ambiental, especialmente em processos subtrativos, que produzem a peça final por meio da remoção de material de um bloco sólido.

Nesse contexto, a manufatura aditiva surge como uma alternativa viável para a construção de antenas com geometrias avançadas (GHASSEMIPARVIN; GHALICHE-CHIAN, 2020). Por produzir as peças camada a camada, esse método possibilita maior liberdade geométrica, ao passo que reduz desperdícios, viabiliza processos de prototipagem rápida e ajustes iterativos sucessivos em projetos com custo reduzido. Neste trabalho, são abordadas amostras produzidas por manufatura aditiva FDM, SLS e manufatura aditiva metálica, cada uma com suas características distintas quanto à precisão, custo e aplicabilidade.

2.2.1 Manufatura Aditiva de Metais por Fusão em Leito de Pó a Laser

O processo de manufatura aditiva de metais utilizado no trabalho de referência (PENCHEL *et al.*, 2024) foi o de Fusão em Leito de Pó a Laser (FLP-L), um método de alta precisão que utiliza um feixe de laser para realizar a fusão seletiva de partículas metálicas, resultando em peças densas com alta fidelidade dimensional, tendo sido utilizada uma altura de camada de 50 μm . As antenas helicoidais foram produzidas em aço *maraging*, um material de resistência mecânica ultra-alta (SANTOS *et al.*, 2022), utilizado em setores aeroespaciais e em componentes de alto desempenho.

As vantagens da produção de antenas por FLP-L são a alta precisão dimensional, a estrutura totalmente metálica, a altíssima repetibilidade entre amostras e a alta fidelidade à geometria do modelo 3D. No entanto, esse método apresenta um custo muito elevado, atrelado a equipamentos e materiais especializados de nível industrial, o que resulta em baixa disponibilidade em ambientes como laboratórios acadêmicos, empresariais, didáticos e de pesquisa devido a essas e outras questões (FRAZIER, 2014). Dessa forma, as antenas fabricadas por este processo são utilizadas como referência ideal para a comparação de desempenho entre as demais amostras neste trabalho. Contudo, vale ressaltar que sua acessibilidade é restrita.

2.2.2 Sinterização Seletiva a Laser

A Sinterização Seletiva a Laser (SLS) é uma técnica de manufatura aditiva que, assim como a FLP-L, utiliza um laser para sinterizar seletivamente partículas de material. Porém, em vez de pó metálico, são depositados polímeros em pó, sendo a poliamida (nylon

PA12) a usualmente utilizada, formando a peça camada a camada. Um destaque deste método é que não são necessários suportes, visto que o próprio pó não utilizado, por ter baixa deformação térmica inerente ao método, serve de sustentação para a peça durante a fabricação, sugerindo ser uma alternativa interessante para a produção das antenas helicoidais de geometria complexa (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2014).

Outras vantagens da manufatura aditiva por SLS são a boa precisão dimensional que apresenta, a capacidade de reproduzir geometrias mais delicadas com superfícies uniformes e seu custo mais baixo em comparação à manufatura metálica. No entanto, visto que se trata de um método baseado em sinterização de polímeros, as antenas produzidas por este método não são condutivas e precisam ser metalizadas para se tornarem antenas funcionais. E, apesar de ter um custo menor que o método anterior, a SLS ainda é considerada um processo caro e demanda equipamentos que também são pouco acessíveis, limitando seu uso principalmente a centros de pesquisa e laboratórios com maiores recursos. Para este trabalho, as antenas produzidas por SLS foram fornecidas pela Universidade Estadual de Campinas, a UNICAMP.

2.2.3 Deposição de Filamento Fundido

A impressão 3D por Deposição de Filamento Fundido (FDM) é um dos métodos de manufatura aditiva mais amplamente difundidos. Isso se dá pela acessibilidade proporcionada pelo custo reduzido dos equipamentos, pela facilidade de utilização e ampla disponibilidade em diversos ambientes, inclusive em ambientes domésticos. Esse método tem evoluído muito nos últimos anos, com tecnologias facilitadoras que automatizam calibrações e compensam imperfeições, aprimorando a qualidade final a cada ano.

Na impressão 3D por FDM, um filamento termoplástico é aquecido e extrudado pelo bico da extrusora, que deposita o material camada a camada. Embora esse método seja o mais acessível em relação aos anteriores, a impressão FDM apresenta limitações quanto à reprodução de geometrias complexas como as apresentadas pelos modelos de antenas helicoidais propostos, especialmente devido às suas dimensões reduzidas. Essas limitações envolvem sua precisão dimensional significativamente inferior, a dificuldade na reprodução de geometrias que contêm *overhangs* (parte de um modelo 3D que se projeta para fora, sem material sólido por baixo para apoiá-lo durante a impressão), presentes em toda a antena helicoidal, e as deformações térmicas que podem comprometer a integridade e a qualidade superficial das antenas. Além disso, as peças fabricadas por esse método também necessitam passar por um processo de metalização para se tornarem condutivas.

Apesar das limitações apresentadas, se contornadas com sucesso, a impressão FDM pode oferecer vantagens relacionadas a redução do custo por peça, ampla acessibilidade e potencial para prototipagem rápida com sucessivas iterações. Esses fatores tornam os processos de experimentação, prototipagem e estudos mais acessíveis.

2.2.3.1 Polímero PLA na Impressão FDM

O ácido polilático (PLA) é um polímero sintético termoplástico amplamente utilizado na impressão 3D FDM. Isso se deve principalmente à sua facilidade de uso, uma vez que não requer uma impressora 3D fechada para evitar variações de temperatura (diferentemente de materiais como o ABS, por exemplo), o que viabiliza sua utilização em impressoras 3D mais básicas. Além disso, o PLA apresenta baixo custo, boa resistência mecânica (SANTANA *et al.*, 2018) e baixa tendência ao empenamento com o uso de impressoras abertas, fatores que o tornam atrativo para a impressão 3D convencional.

Vale ressaltar que, embora o ponto de fusão do PLA seja comumente em torno de 165°C, sua temperatura de transição vítrea é relativamente baixa, próxima de 60°C (SANTANA *et al.*, 2016). Isso indica que ele pode sofrer deformações térmicas em cenários de aquecimento moderado, como a exposição prolongada ao sol, em ambientes quentes ou em contato com componentes aquecidos.

2.3 Metalização de Superfícies

Visto que as peças produzidas pelos métodos de manufatura aditiva por SLS e FDM são de polímero e, portanto, não condutivas, faz-se necessário utilizar um processo de metalização para que a amostra impressa possa conduzir corrente elétrica por sua superfície, permitindo que funcione como uma antena. Nesse caso, o material condutor aplicado deve apresentar boa aderência às antenas e baixa resistividade para viabilizar a condução de corrente e a irradiação de maneira eficiente.

Existem diferentes abordagens que podem ser utilizadas para esse fim. Entre elas, algumas oferecem excelente condutividade elétrica e boa uniformidade ao longo da peça, como a pulverização térmica e a metalização à vácuo. Porém, esses métodos envolvem equipamentos especializados de nível industrial e custos elevados, além de operarem com temperaturas altas que deformariam completamente a estrutura dos polímeros impressos em SLS e FDM, tornando esses métodos incompatíveis para esta finalidade.

A aplicação de tintas condutivas à base de carbono é uma técnica amplamente acessível, de baixo custo e de fácil aplicação. No entanto, suas propriedades elétricas apresentam níveis de resistividade muito superiores, e sua aplicação não atende às exigências de desempenho para aplicações em antenas de maneira adequada (MESQUITA *et al.*, 2019). Contudo, esse tipo de revestimento pode ser útil como camada preliminar para processos de galvanização, atuando como cátodo em processos como eletrodeposição ou deposição por meio de processos químicos, capazes de criar uma camada fina de metais, como o cobre, na superfície da peça, reduzindo significativamente a resistividade a níveis satisfatórios (GHASSEMIPARVIN; GHALICHECHIAN, 2020). Esses métodos exigem uma preparação química rigorosa e um maior controle sobre o processo.

Diante dessas limitações nos processos de metalização, surge como solução prática a utilização de tintas condutivas formuladas com partículas metálicas dispersas em meio polimérico, que garantem bons níveis de condutividade, ao mesmo tempo em que indicam boa aderência às superfícies de polímero das antenas estudadas. Além disso, a tinta condutiva com essas características pode ser aplicada de formas tão simples quanto a aplicação manual utilizando um pincel, desde que as camadas sejam depositadas de maneira contínua e uniforme para garantir boa performance em finalidades de radiofrequência.

Por esses motivos, e levando em consideração o cenário de prototipagem e experimentação acadêmica, este trabalho adota a aplicação de uma tinta condutiva à base de flocos de cobre revestidos de prata como método de metalização de superfícies, garantindo um equilíbrio entre simplicidade de aplicação, custo relativamente baixo, boa aderência às superfícies das antenas impressas em polímero e condutividade adequada para possibilitar uma operação eletromagnética eficaz.

3 Metodologia

3.1 Escolha e Obtenção dos Materiais e Métodos

A etapa de preparação e planejamento do trabalho foi marcada por uma série de pesquisas que tinham como objetivo determinar os materiais e, por consequência, os métodos que seriam utilizados para o processo de manufatura das antenas. Algumas das considerações que levaram à escolha dos mesmos foram descritas na seção anterior. Outros materiais e instrumentos diversos foram utilizados nos laboratórios da UNESP com as devidas instruções e monitoramento dos respectivos técnicos de cada seção.

Neste trabalho, o PLA foi adotado como material para a fabricação das antenas impressas em FDM devido à sua capacidade de oferecer um equilíbrio entre custo, facilidade de utilização e grande disponibilidade de informações técnicas, além de boa qualidade superficial quando associado à otimização dos parâmetros de impressão. As impressoras 3D utilizadas para impressão foram a *Creality Ender 3 Pro* (CREALITY, 2025) e a *Creality Ender 3 V3 KE* (CREALITY, 2023), ambas classificadas como modelos de entrada, sendo esta última mais recente e com recursos adicionais que auxiliam na calibração e melhoram a experiência geral de uso.

A tinta condutiva selecionada para a metalização de superfície das antenas foi a 843WB da *MG Chemicals*. O Anexo A, ao final deste documento, apresenta a ficha técnica referente a ela. Esse produto contém uma formulação à base de água, com partículas metálicas dispersas, sendo flocos de cobre revestidos de prata. Dentre as opções disponíveis para compra, ela foi uma das que apresentaram os menores valores de resistividade ($5,3 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$). Em suas informações técnicas, alega ter boa aderência a superfícies plásticas e uma viscosidade (em torno de 660 cP) que facilita sua aplicação, a qual pode ser feita com pincel, entre outros métodos. Essas características a tornam adequada para metalizar as peças impressas neste trabalho.

Para realizar a etapa de metalização das antenas, optou-se pela aplicação manual com um pincel macio e estreito o suficiente para permitir alcançar adequadamente as regiões internas das espiras das antenas, a fim de garantir uma camada uniforme ao longo de toda a superfície. Outros métodos foram inicialmente considerados, como a aplicação por esponja, por pistola de tinta ou aerógrafo. No entanto, a aplicação por esponja foi descartada por apresentar menor uniformidade na camada de tinta e dificuldades para alcançar a parte interna das espiras, enquanto o uso de aerógrafo ou pistola de tinta foi inviabilizado devido à elevada perda de material que ocorreria e à ausência de um equipamento que atendesse às recomendações do fabricante para essa tinta condutiva.

Assim, a aplicação com pincel mostrou-se a alternativa mais adequada para garantir que a camada de tinta recubra toda a superfície das antenas, com perdas mínimas de material.

Os projetos para modelagem 3D das antenas utilizadas neste trabalho foram disponibilizados por Penchel *et al.* (2024). Os três modelos foram ligeiramente modificados utilizando o *software Autodesk Fusion 360* para incluir o furo de fixação na base das antenas, a fim de possibilitar a posterior montagem da antena no pino do conector coaxial *SubMiniature version A* (SMA) a ser utilizado.

3.1.1 Testes Iniciais com a Tinta Condutiva

O primeiro teste em laboratório foi realizado com a finalidade de validar as características da tinta condutiva 843WB e os possíveis métodos de aplicação para ela. Os principais objetivos nesta etapa eram verificar a capacidade de condutividade elétrica da tinta e aspectos como sua viscosidade, a fim de determinar os meios de aplicação e sua aderência às superfícies. Para isso, foram feitas aplicações após a agitação do produto, conforme orientado pelo fabricante, em corpos de prova impressos em 3D com PLA, contendo um canal no centro para conter a tinta, e também em uma lâmina de vidro para microscópio. A aplicação foi feita com uma pequena esponja após a limpeza adequada das peças, utilizando álcool isopropílico para remover impurezas e garantir um contato direto entre elas e a tinta condutiva, avaliando a aderência do produto sem sofrer influência de possíveis gorduras, poeira e outros contaminantes com potencial de impactar essa análise. A Figura 3 demonstra os materiais utilizados neste teste, dispostos na capela do laboratório.

Figura 3 — Materiais utilizados para os testes iniciais com a tinta condutiva.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Observou-se que a secagem parcial ocorreu em aproximadamente 15 minutos, sendo possível manusear o objeto pintado sem retirar o produto. A recomendação do fabricante

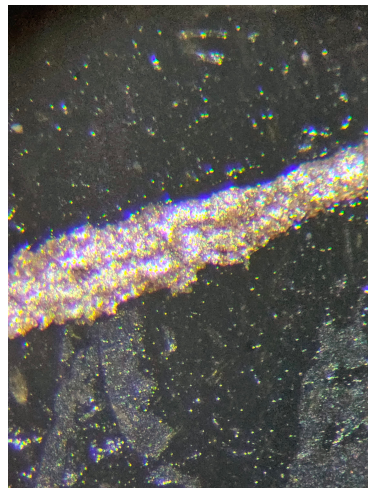
para a cura total desta tinta é de 24 horas a 22°C, tempo que foi respeitado para todas as medições presentes neste trabalho.

Após a cura total, verificou-se que a tinta condutiva em questão apresenta uma aderência notável e certa elasticidade ao deformar o material. Em seguida, foi utilizado um multímetro na função de teste de continuidade para verificar a capacidade de condutividade elétrica da tinta, o qual validou a escolha da tinta condutiva 843WB, visto que demonstrou resultados excelentes de continuidade e aderência ao polímero a ser utilizado na confecção das antenas.

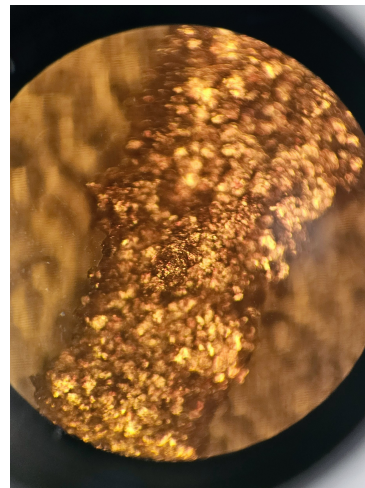
3.1.2 Observação da Espessura da Camada de Tinta

A tentativa de observar a camada de tinta aderida ao corpo de prova foi realizada utilizando um microscópio de bancada disponível no laboratório.

Figura 4 — Observação em Microscópio de uma Lasca Curada da Tinta Condutiva.



(a) Lasca de Tinta Condutiva em Microscópio.



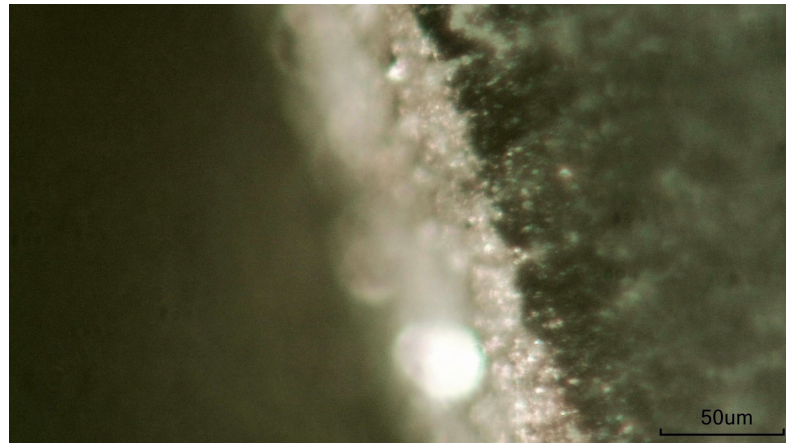
(b) Visualização da Lasca com Ampliação Aumentada.

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Com esse teste, foi possível observar a aderência da camada de tinta condutiva aplicada, que se demonstrou ótima. Na Figura 4, que demonstra a observação de uma lasca de tinta condutiva curada, notou-se a presença das partículas metálicas contidas no fragmento, sendo reportada pela fabricante uma porcentagem de sólidos de 42% na tinta não curada, fator que torna possível a desejada condição de condutividade elétrica nas antenas a serem construídas. Além disso, no momento da remoção desta lasca para observação no microscópio, foi observada novamente uma ótima aderência e considerável elasticidade da tinta.

A Figura 5, capturada pelo *software* pertencente ao microscópio utilizado, possibilitou a observação da linha divisória entre o material PLA da peça impressa em 3D e a fina camada da tinta condutiva. Por meio desta, foi possível remanejar a escala presente na

Figura 5 — Camada de Tinta Condutiva em Contato com o PLA.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

captura do dispositivo por meio de *software* convencional de edição de imagem e, assim, estimar a espessura da camada de tinta. O valor encontrado por meio desta abordagem foi de aproximadamente 25 micrômetros, não alcançando o valor mínimo recomendado pelo fabricante, que é de 30 micrômetros. Isso pode ser explicado pelo método de aplicação por esponja, que resultou na deposição não uniforme do produto, com algumas regiões apresentando arrasto de material, inclusive ao longo do trecho observado, gerando uma camada levemente mais fina durante as tentativas de realizar este teste com diferentes amostras. Isso foi levado em consideração para as subseqüentes aplicações da tinta condutiva nas antenas.

3.1.3 Método de Aplicação

A utilização da esponja como ferramenta de aplicação é um método eficaz para objetos de geometria simples. Contudo, para a finalidade deste trabalho, notaram-se pequenas não uniformidades na camada de tinta após a secagem da mesma. Sendo assim, pode ser necessário realizar uma segunda aplicação para garantir o recobrimento total da superfície. Além disso, o formato complexo de hélice das antenas é outro fator que impacta a escolha do método de aplicação, visto que a esponja se mostrou um exemplo inviável para essa finalidade, uma vez que apresenta dificuldades para a pintura da superfície interna da hélice das antenas.

Portanto, todas as aplicações subseqüentes foram realizadas com o uso de um pincel macio e estreito, selecionado para permitir alcançar a superfície interna das espiras das antenas com maior facilidade. Este método proporcionou maior controle durante a aplicação, resultando em uma camada de tinta com uniformidade satisfatória ao longo de toda a estrutura, dispensando a necessidade de uma segunda demão ou retoques adicionais. Além disso, o método com pincel permitiu que as aplicações fossem realizadas com menor perda de material e garantiu boa aderência do produto às superfícies das antenas em PLA.

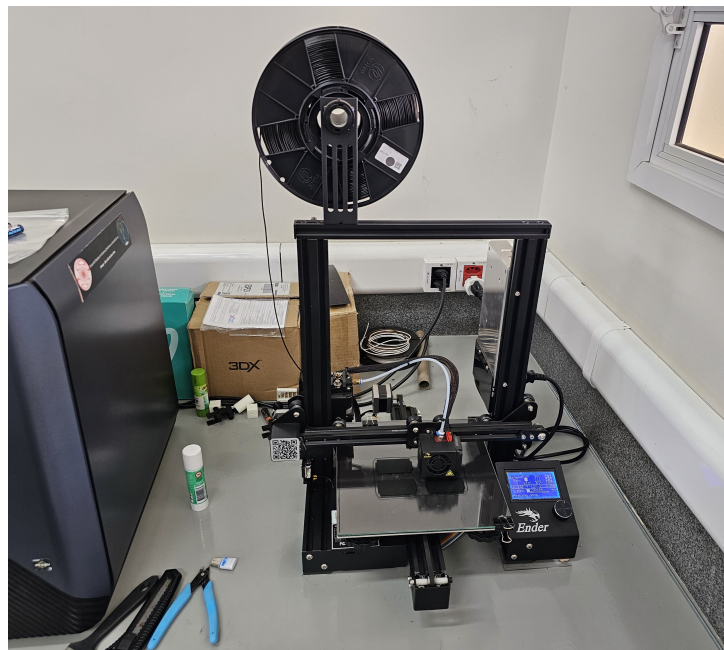
3.2 Processo de Manufatura das Antenas Helicoidais

Nesta seção, são apresentadas as etapas experimentais de impressão, metalização e construção das antenas. Devido ao grande número de iterações realizadas e à variabilidade inerente entre diferentes modelos de impressoras 3D e filamentos, as configurações finais dos parâmetros de impressão desenvolvidas para cada modelo foram consolidadas e descritas no Apêndice A. Neste capítulo, descrevem-se os ajustes que se mostraram relevantes e decisivos.

3.2.1 Estratégias Iniciais de Impressão

Os primeiros testes de impressão das antenas helicoidais em PLA foram realizados utilizando uma impressora 3D FDM básica, porém amplamente conhecida pela versatilidade que oferece a baixo custo: a *Creality Ender 3 Pro*, disponível para uso no Laboratório de Materiais da Universidade. A Figura 6 apresenta a impressora utilizada. O *software* de fatiamento utilizado foi o *PrusaSlicer*.

Figura 6 — Impressora 3D e Acessórios Utilizados em Laboratório.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Inicialmente, foram feitas tentativas de impressão da antena na vertical, com seu eixo principal orientado para cima, tendo sua base em contato com a mesa de impressão, e sem a utilização de suportes, com o objetivo de evitar perdas de material e deformações na superfície. No entanto, essa configuração resultou em falhas prematuras durante o processo devido a uma série de fatores possíveis descritos adiante. As variáveis de impressão foram ajustadas no *software* de fatiamento a partir de um perfil pré-definido, de maneira a seguir a faixa de valores fornecida pelo fabricante do material PLA em relação às temperaturas

da mesa e da extrusora (VOOLT3D, 2025), que geralmente variam entre fabricantes e diferentes linhas de produtos, dependendo dos aditivos utilizados, incluindo os pigmentos. Foram realizadas calibrações na *Ender 3 Pro* antes das primeiras tentativas de impressão das antenas. Neste período, foi escolhida a antena Modelo III para os testes por possuir um maior diâmetro da base e um encurtamento no diâmetro do “fio” da antena ao longo de seu comprimento, características inicialmente consideradas facilitadoras. Sendo que o objetivo, neste momento, era concluir sua impressão de forma satisfatória. Para aumentar a adesão da antena à mesa da impressora 3D, foi utilizado o recurso *brim* (borda de adesão).

3.2.2 Tentativas de Impressão com as Antenas na Horizontal

Após algumas iterações com modificações nos parâmetros do fatiador relacionadas à altura de camada, velocidades de movimento, temperatura da mesa e temperatura do bico extrusor não terem gerado resultados satisfatórios, optou-se pela impressão da antena com seu eixo principal rotacionado em 90°, tendo as espiras em contato com a mesa de impressão, com a premissa de contornar parte dos problemas relacionados ao formato helicoidal das antenas em sua configuração vertical. Para tal, foi necessário utilizar *brims* (bordas de adesão) ao longo das partes da espira que faziam contato com a mesa de impressão e, ainda, um suporte para a base da antena, a qual seria uma parte flutuante que falharia sem a utilização desse recurso. Foi ainda testada a utilização de suportes para as regiões de “pico” das hélices.

No entanto, visto que os ajustes de parâmetros como altura de camada, temperatura, velocidade e tentativas de implementação de suporte geraram resultados insatisfatórios e com geometria não fiel aos modelos originais, foi determinado que as antenas precisariam ser impressas em sua orientação vertical.

3.2.3 Otimização de Impressões na Vertical

Nesse momento, foram realizadas novas impressões com as antenas orientadas na vertical. Para isso, foram feitos ajustes nos parâmetros do *software* de fatiamento, variando a altura de camada, utilizando valores entre 0,08 mm e 0,12 mm, e diminuindo a temperatura do bico, além de habilitar *Brim* para auxiliar na adesão da peça à mesa de impressão. Foi explorada também a utilização de suportes com o objetivo de obter uma primeira antena completa com qualidade superficial adequada, visto que apenas as mudanças nos parâmetros não possibilitaram um resultado considerado satisfatório. O suporte em árvore, do tipo orgânico, foi escolhido para esse objetivo, pois, no momento, acreditava-se que ele seria o ideal para ser utilizado nesse tipo de geometria das antenas. Além disso, o suporte padrão (linear) demonstrou um processo de remoção complexo, o qual ocasionou quebras durante o processo e gerou maiores deformações na superfície das antenas. Nesse momento, foi utilizada a antena de modelo II, visto que as partes finas da

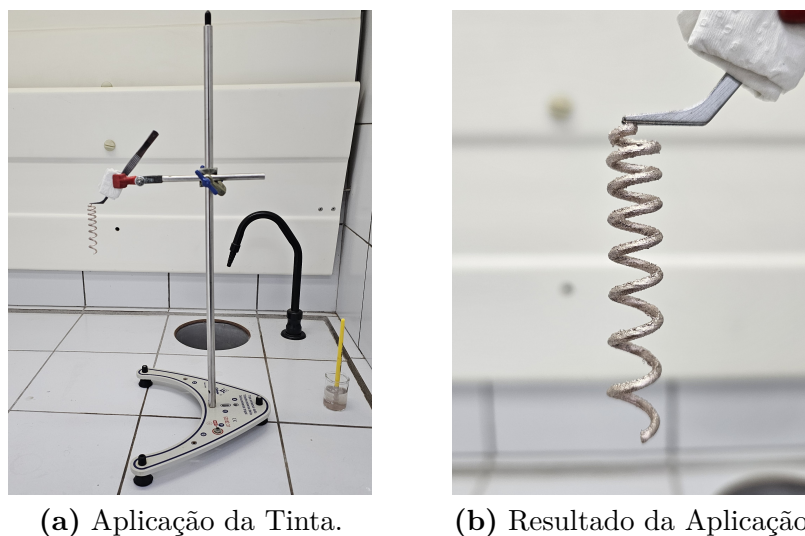
extremidade superior de antenas do tipo III se anexavam ao suporte mais facilmente e se partiam na sua remoção.

A utilização de suporte do tipo árvore e sua configuração de parâmetros quanto à densidade de galhos e distância entre o suporte e a peça principal permitiram que fosse finalizada a primeira impressão de uma antena de forma completa, com falhas consideradas aceitáveis para essa etapa do trabalho. Essa abordagem, no entanto, necessitou de maior atenção e tempo na remoção do material de suporte, visto que foi necessária uma densidade maior de apoio para que a antena se mantivesse estável durante a impressão, mitigando os arrastos gerados pelo bico extrusor. Para remover as deformações observadas, foi utilizada uma lixadeira elétrica convencional para unhas. Dessa forma, foi alcançada a primeira antena impressa com um resultado considerado satisfatório para ser encaminhada à etapa de metalização de superfície.

3.2.4 Metalização de Superfície e Construção da Primeira Antena

Nessa primeira antena, foi realizada a aplicação da tinta condutiva com a utilização de um pincel macio e estreito. Nota-se que é necessário aplicar o produto também na parte interna do furo da base da antena para que, posteriormente, faça contato com o pino do conector SMA. Seguindo essa abordagem, após intensa agitação do frasco de tinta condutiva, foi realizada a metalização de superfície da primeira antena por meio de sua pintura na capela do laboratório, onde ficou em repouso até a cura completa do produto, como demonstra a Figura 7.

Figura 7 — Aplicação de Tinta Condutiva na Antena Obtida.



(a) Aplicação da Tinta.

(b) Resultado da Aplicação.

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Em seguida, foi necessário realizar o encaixe da antena no pino do conector SMA através do furo em sua base, enquanto o disco de alumínio do plano terra havia sido posicionado no teflon ao centro do conector.

3.2.5 Medição da Primeira Antena Completa

Apesar das dificuldades encontradas no processo de encaixe, foi alcançado um primeiro modelo montado. A antena não teve uma fixação ideal, sendo parte do motivo as diferentes tentativas de fixação no pino do conector SMA, mas foi suficiente para que se pudesse realizar uma medição preliminar como teste. Assim sendo, foi realizada a primeira medição de $|S_{11}|$ para essa antena, utilizando o Analisador de Espectro *FieldFox* N9918B da *Keysight*. Esse dispositivo possibilita medir a intensidade de um sinal de RF (radiofrequência) sobre uma faixa definida de frequências.

A medição de $|S_{11}|$ indica a fração da potência incidente na porta de alimentação que é refletida de volta à fonte devido ao descasamento de impedâncias entre a antena e a linha de transmissão (POZAR, 2012). Valores mais negativos de $|S_{11}|$ representam um melhor casamento de impedâncias e maior eficiência na transferência de potência, sendo comum a adoção do critério de um $|S_{11}|$ inferior a -10 dB como indicativo de desempenho adequado em sistemas de RF e micro-ondas.

Após a constatação do resultado dessa primeira medição, foram estudadas outras maneiras de proporcionar melhorias, continuando os testes de impressão com diferentes combinações de configurações.

3.2.6 Antenas Produzidas por Manufatura SLS

Com a finalidade de realizar testes comparativos, foram utilizadas antenas construídas utilizando um método de impressão mais preciso: a impressão por sinterização seletiva a laser (SLS), que utiliza um laser para fundir seletivamente camadas de pó de polímero. Nesse caso, foi utilizado nylon. As antenas foram metalizadas utilizando o mesmo método de aplicação da tinta condutiva anterior sobre suas superfícies. Devido à metalização simultânea dessas amostras, houve apenas uma mudança no processo de aplicação: primeiro, pintou-se apenas metade da estrutura de cada antena e, após a cura parcial, concluiu-se a pintura do restante. Esse processo pode ser observado na Figura 8.

3.2.7 Busca pela Otimização da Qualidade de Impressão das Antenas de Modelo III

Finalizados os testes iniciais em laboratório, deu-se início a uma nova etapa de testes, utilizando a impressora de uso pessoal *Creality Ender 3 V3 KE*, com o objetivo de tornar a realização dos testes mais dinâmica, possibilitando a realização de calibrações e manutenções mais assertivas e que se manteriam por mais tempo, além de garantir maior liberdade de experimentação e um controle maior de variáveis, utilizando o *OrcaSlicer* como *software* de fatiamento.

Figura 8 — Processo de Metalização Simultânea das Antenas Produzidas por SLS.



(a) Processo de Metalização.

(b) Antenas Metalizadas.

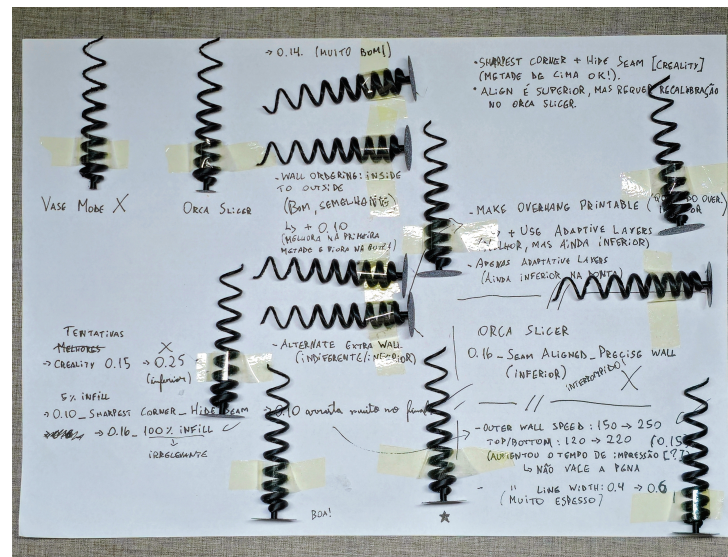
Fonte: Elaborada pelo Autor.

Após a devida calibração da impressora 3D, foram iniciados os testes de impressão com as antenas de modelo III, já que possuem uma base mais espessa (1 mm maior que os modelos I e II), o que garante melhor adesão e flexibilidade na modificação de parâmetros. Por outro lado, as antenas de modelo III apresentam um afinamento gradual na seção transversal da hélice ao longo de seu comprimento, atingindo apenas 1 mm de espessura na extremidade superior, o que representa um desafio para a impressão FDM juntamente com a geometria da antena helicoidal. O objetivo inicial desses testes era alcançar uma impressão completa com uma estrutura uniforme, sem recorrer à utilização de suportes, justamente para promover uma observação mais precisa dos impactos de cada mudança nos parâmetros e, assim, obter um maior entendimento e controle sobre eles.

Em seguida, foram realizados ajustes sucessivos nos parâmetros de fatiamento, sendo que o próprio *software* fatiador *OrcaSlicer* apresenta definições e *links* com explicações referentes a cada recurso e parâmetro, como temperatura do bico, temperatura da mesa, velocidade de impressão, altura de camada, retração, fluxo e ventilação (OrcaSlicer, 2025). Durante esta etapa e adiante, cada nova antena impressa foi catalogada e as alterações feitas de uma para a outra foram anotadas, como pode ser observado na Figura 9.

Para cada tipo de imperfeição, foi experimentada uma série de ajustes específicos, enquanto se observava o reflexo das mudanças em outras regiões da antena. Essa abordagem tornou o processo de encontrar o equilíbrio entre os parâmetros um desafio constante, dado que a modificação de um parâmetro muitas vezes influenciava outros, já ajustados ou não. Cada impressão completa demandava entre 30 e 45 minutos devido às velocidades mais lentas e à altura de camada baixa (que aumenta o número de camadas individuais

Figura 9 — Primeiros Registros de Mudanças de Configuração.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

e, por consequência, o tempo de impressão). Foram registradas aproximadamente 84 impressões completas, com anotações de cada variação de parâmetro aplicada, demonstradas na Figura 10. Em alguns momentos, foi necessário realizar “*resets* gerais” no fatiador, retornando aos valores próximos do padrão para redefinir a calibração e buscar novos caminhos que levassem a diferentes equilíbrios entre parâmetros de configuração, a fim de que se alcançassem resultados cada vez mais otimizados.

Figura 10 — Registros das Modificações de Configuração entre Iterações.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

3.2.8 Soluções de Viabilização de Impressão para as Antenas de Modelo I e II

Encontrada uma configuração de parâmetros capaz de gerar um resultado satisfatório com repetibilidade para as antenas de tipo III, deu-se continuidade ao trabalho com testes de otimização para os demais modelos, a partir do perfil de configurações obtido para antenas de modelo III. Ao passar para as antenas de tipos I e II, surgiram novas dificuldades devido às bases mais finas, que resultavam em instabilidade nas camadas superiores e impossibilitavam a conclusão das impressões. O modelo I, em especial, apresenta uma seção reta, conectada à base, antes de dar início à espiral, o qual exige o uso de suportes para possibilitar a deposição adequada de material nessa região.

3.2.8.1 Análises para Encontrar o Tipo de Suporte Adequado

Diante do reconhecimento dessas limitações, após uma série de tentativas de otimização de parâmetros, decidiu-se pela utilização de suportes para as antenas helicoidais de tipo I e II. Foram realizados testes de impressão implementando diferentes tipos de suporte. Inicialmente, utilizou-se o suporte do tipo árvore (orgânico), comum em impressões de geometrias complexas com regiões de *overhang*. Foram testadas variações desse suporte, reduções de densidade e sua implementação apenas até a metade da antena, com a premissa de facilitar a remoção de material.

A partir dos resultados observados, optou-se pela avaliação do suporte do tipo Normal, em sua configuração Linear. Agora, com um entendimento superior em relação ao impacto dos parâmetros, foi realizado um ajuste nos valores relacionados ao suporte.

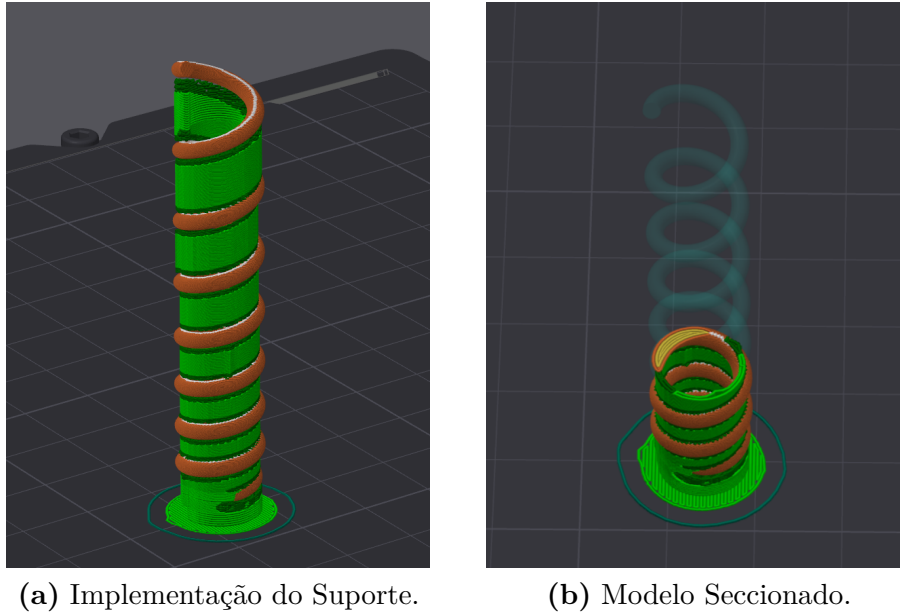
O grande salto de qualidade final e de repetibilidade para as antenas helicoidais dos tipos I e II aconteceu quando foi explorada a utilização de uma variação do suporte do tipo Normal, denominada *Snug*, que se mostrou decisiva para a conclusão dessa etapa. A Figura 11 demonstra a implementação do suporte *Snug* (em verde) no *Orca Slicer*, evidenciando suas características.

Com a adoção dessa variação, foram realizadas otimizações adicionais nos parâmetros do suporte do tipo *Snug*, a fim de torná-lo mais simples de remover e com menor uso de material, sem comprometer a estabilidade durante a impressão.

3.2.8.2 Rotação em 180° na Orientação de Impressão das Antenas de Modelos I e II

Durante a fase de testes dos diferentes tipos de suporte, foi observado outro fator complicador: a inconsistência do diâmetro do furo na base das antenas. Algumas das impressões chegaram a resultar em furos parcialmente ou completamente preenchidos, dificultando ou impossibilitando a fixação posterior da antena no pino do conector SMA. Essa limitação se dava em função do tamanho reduzido da base, ainda mais nos modelos de

Figura 11 — Geração de Suporte do Tipo *Snug* no *Software* de Fatiamento.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

tipo I e II, com diâmetro externo de apenas 2 mm, o que faz com que cada camada possua uma parede muito fina, visto que é necessário considerar o diâmetro de 1,27 mm dedicado para o furo interno da base, demandando um resfriamento eficiente e uma deposição precisa.

Depois de algumas iterações com modificações de parâmetros sem melhoria significativa, principalmente na consistência da base, testou-se uma nova orientação de impressão para as antenas dos tipos I e II, rotacionando os modelos em 180° , de forma que a base fosse impressa voltada para cima e, portanto, construída por último.

Imprimir as antenas nessa orientação com um resultado satisfatório foi possível por meio da utilização de suportes do tipo *Snug*. Para reduzir as deformações que foram observadas na ponta das antenas (orientadas para baixo durante a impressão), foi utilizado o recurso *Raft* do fatiador, que gera um número definido de camadas iniciais adicionais entre a peça e a mesa de impressão, como pode ser observado na Figura 12.

3.2.9 Consolidação dos Parâmetros de Impressão e Construção das Antenas

Dessa forma, o conjunto de configurações otimizadas, desenvolvido ao longo das diversas iterações produzidas durante o trabalho, permitiu que se alcançassem impressões consistentes e de qualidade satisfatória para os três modelos de antenas helicoidais propostos. Posteriormente, testou-se a fixação das antenas no conector SMA e, em seguida, realizou-se a metalização dos modelos, seguindo o mesmo procedimento de aplicação da tinta condutiva adotado anteriormente.

Com os modelos metalizados, realizou-se a caracterização de cada antena por meio

Figura 12 — Antena de Modelo II Orientada em 180° com *Raft* e Suporte *Snug*.



(a) Modelo no *Orca Slicer*.

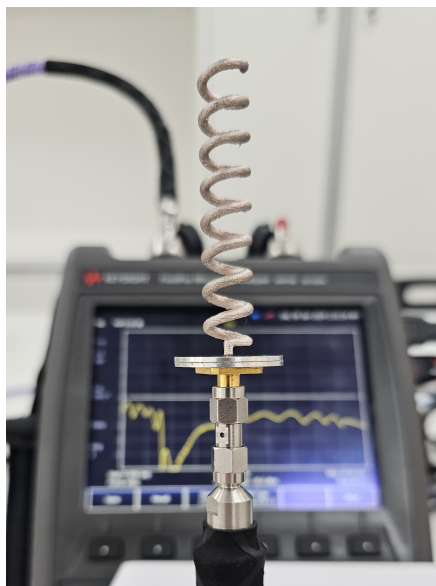


(b) Modelo Impresso.

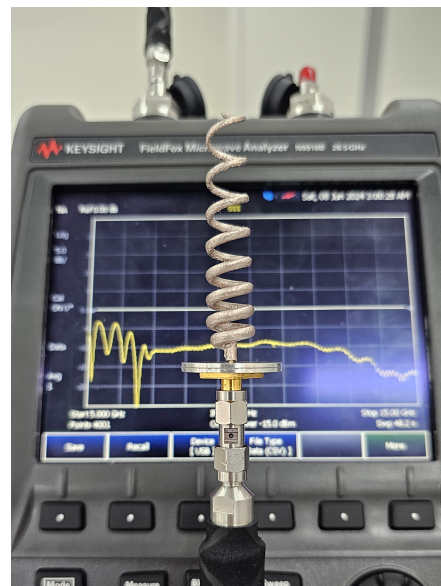
Fonte: Elaborada pelo Autor.

de medições de $|S_{11}|$. As medições foram conduzidas no laboratório de telecomunicações da universidade por meio de um Analisador de Espectro *FieldFox* N9918B (*Keysight*), como demonstrado na Figura 13. Os resultados obtidos foram exportados em formato *.csv*, possibilitando análises e comparações visuais entre antenas produzidas por diferentes métodos de manufatura, incluindo as antenas fabricadas por manufatura aditiva de metais e por sinterização a laser seletiva (SLS). Para elaborar a geração dos gráficos e as comparações visuais entre os resultados de cada antena, foi utilizado o *software MATLAB*.

Figura 13 — Medição das Antenas em Laboratório.



(a) Antena de Modelo I.



(b) Antena de Modelo III.

Fonte: Elaborada pelo Autor.

4 Resultados e Discussões

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com as etapas de otimização das configurações de impressão das antenas helicoidais, realizada por meio de múltiplas iterações e ajustes nos parâmetros do software de fatiamento. São discutidos tanto os resultados alcançados em relação à qualidade das impressões FDM quanto ao desempenho eletromagnético das amostras, por meio das medições de $|S_{11}|$.

4.1 Resultados Iniciais de Impressão das Antenas na Vertical

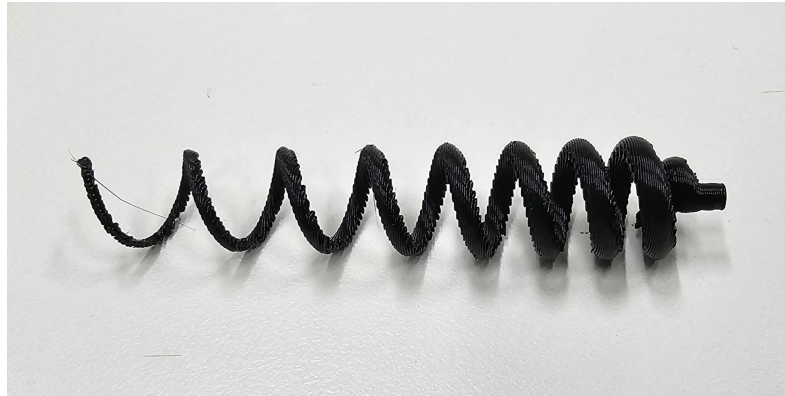
Durante esta primeira etapa, identificaram-se dificuldades relacionadas ao formato helicoidal das antenas, que demanda uma impressão constante de *overhangs* (partes suspensas impressas “no ar”, sem sustentação, que tendem a gerar falhas durante o processo). Além disso, o “efeito de mola” produzido pela geometria da antena helicoidal, juntamente com seu tamanho reduzido (menor massa e menor resistência a tal efeito), fazia com que o bico extrusor a arrastasse frequentemente durante a impressão, principalmente em camadas mais altas, com a altura do objeto intensificando a deformação causada. As camadas depositadas que não eram suficientemente resfriadas a tempo contribuíam para esse efeito, gerando falhas e deformações.

Outro fator complicador era que o material PLA, assim como outros utilizados na impressão FDM, demonstrava tendências a curvar-se para cima devido ao resfriamento rápido com diferença de temperatura entre as finas camadas depositadas. Isso causava colisões dessas partes altas com o bico extrusor, o que ocasionava grandes deformações e até mesmo a remoção da antena da mesa de impressão. A presença constante de *overhangs* e a natureza da geometria das antenas aumentam essa tendência de deformação, uma vez que a deposição e o resfriamento ocorrem em uma quantidade reduzida de material, não permitindo que o PLA extrusado consiga aderir e dissipar calor de maneira adequada, não solidificando-o apropriadamente e gerando deformações e falhas. Esses efeitos também foram observados em testes realizados com antenas de modelo II. A Figura 14 apresenta a primeira antena impressa por completo obtida nessa configuração.

4.1.1 Resultados da Impressão das Antenas na Horizontal

Durante os testes realizados com as antenas na horizontal, percebeu-se que essa orientação não era viável para a finalidade desejada. A Figura 15 apresenta os resultados iniciais das impressões das antenas rotacionadas em 90° , com a antena que obteve o melhor resultado para a orientação vertical no canto inferior direito. Mesmo utilizando bordas

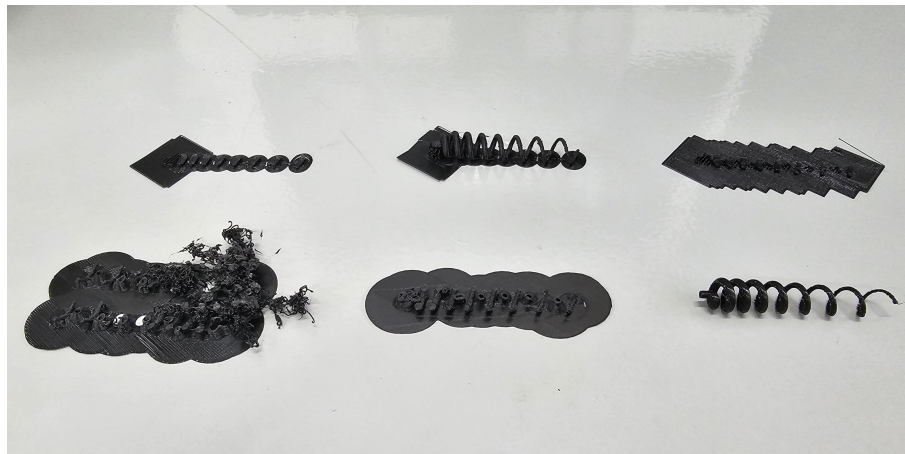
Figura 14 — Primeira Antena de Impressão Completa.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

adicionais para aumentar a adesão da peça na mesa de impressão, múltiplas tentativas resultaram em falhas.

Figura 15 — Resultados Iniciais de Variações de Impressão na Horizontal.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Nos casos em que foram completadas, ficou evidente que, apesar da configuração de uma altura de camada consideravelmente pequena (0.10 mm), a superfície das antenas não apresentava uma curvatura suave e exibia não uniformidades, principalmente nas curvaturas das extremidades verticais, tendo seu formato original distorcido e o furo da base, muitas vezes, preenchido. Essas imperfeições tornariam necessário realizar mais etapas de acabamento na superfície da antena para que, talvez, se obtivesse um resultado próximo do satisfatório. Parte do problema pode ser explicado pelo efeito de “pé de elefante” da impressão 3D, que deforma a região da peça que está em contato com a mesa de impressão. A Figura 16 demonstra o melhor resultado obtido para a orientação da antena rotacionada em 90°.

A implementação de suportes ocasionava falhas de impressão mais frequentes. A constante movimentação do bico de uma parte para a outra das hélices causava colisões com partes do material recém-depositado que se curvavam para cima devido principalmente

Figura 16 — Melhor Resultado de Impressão na Horizontal.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

ao resfriamento inadequado, resultando em falhas de impressão. Com essas considerações, foi determinado que as antenas precisariam ser impressas com orientação vertical.

4.1.2 Otimização da Impressão de Antenas na Vertical com a Utilização de Suportes

O suporte do tipo árvore mostrou-se efetivo, porém, com sua utilização, eram geradas muitas perdas de material, como pode ser evidenciado pela Figura 17. Além disso, esse suporte é de difícil remoção devido às pequenas dimensões e à geometria de cada antena, demandando muito tempo e, ocasionalmente, causando quebras na estrutura principal, ou seja, mais perdas. As antenas que tiveram seus suportes removidos com sucesso apresentaram algumas imperfeições que demandavam um certo acabamento.

Figura 17 — Resultados da Utilização do Suporte em Árvore.

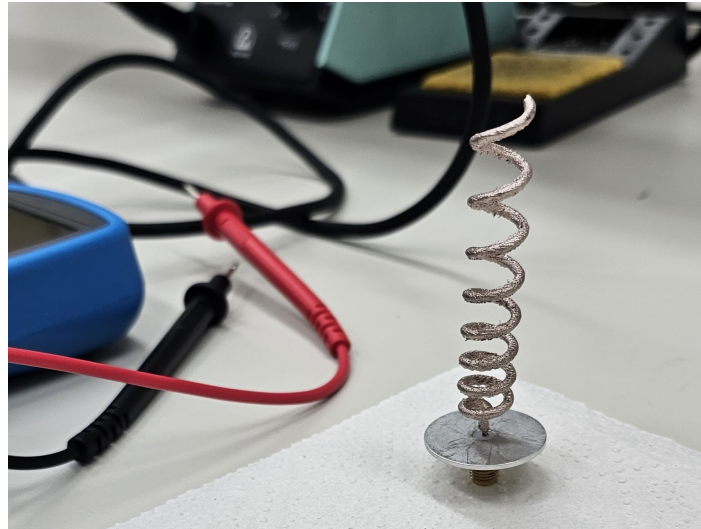


Fonte: Elaborada pelo Autor.

4.1.3 Montagem da Primeira Antena Completa

Após a aplicação e cura da tinta condutiva na antena, seguida de sua montagem no conector SMA, obteve-se a primeira antena helicoidal finalizada, com sua superfície completamente recoberta e capaz de conduzir corrente, fato evidenciado por um teste simples de continuidade realizado com um multímetro.

Figura 18 — Montagem da Primeira Antena.

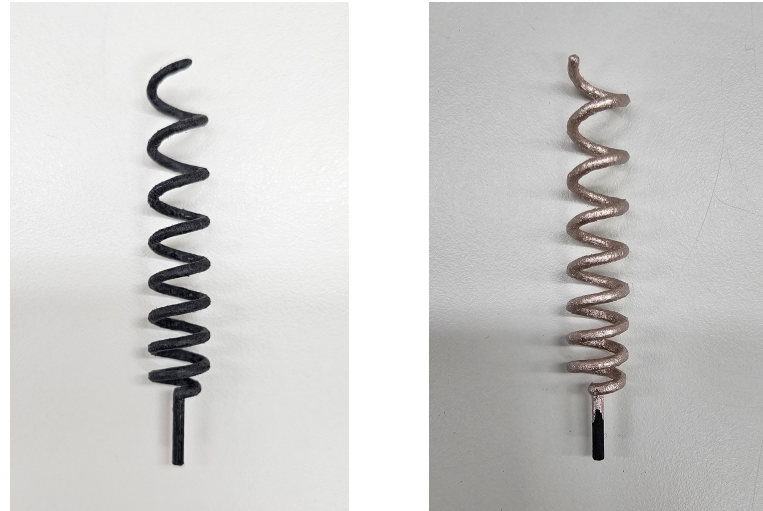


Fonte: Elaborada pelo Autor.

Nota-se que, nessa primeira estrutura, apresentada na Figura 18, a camada de tinta aplicada apresentou imperfeições na superfície, oriundas de falhas na impressão 3D e de restos de PLA do processo de finalização que se deslocaram durante a pintura. Isso foi adquirido como aprendizado e mitigado para as próximas aplicações da tinta condutiva. A Figura 19 demonstra uma antena de teste, cujos processos de finalização e aplicação da tinta foram realizados levando em consideração o aprendizado anterior.

Esse processo de montagem da estrutura da antena revelou algumas dificuldades em seu encaixe no pino do conector. Alguns fatores observados que levaram a essa dificuldade são a resolução insuficiente da impressora 3D e de seu bico de 0,4 mm para lidar com dimensões tão pequenas, o que pode acarretar impactos na integridade da estrutura do furo e da base da antena, e o fato de o polímero tender a deformar quando é realizado o encaixe com certa força, parcialmente inviabilizando a remoção e reinserção frequente da antena no conector, visto que há uma camada muito fina de PLA na base das antenas, o que é agravado ainda mais dependendo do modelo da antena. Cabe ressaltar que a distância entre a base da antena e o disco do plano terra é um dos fatores que impactam seu comportamento de irradiação, e, portanto, é um ponto a se buscar uma solução no futuro.

Figura 19 — Resultado da Antena de Teste.



(a) Antes da Aplicação da Tinta.

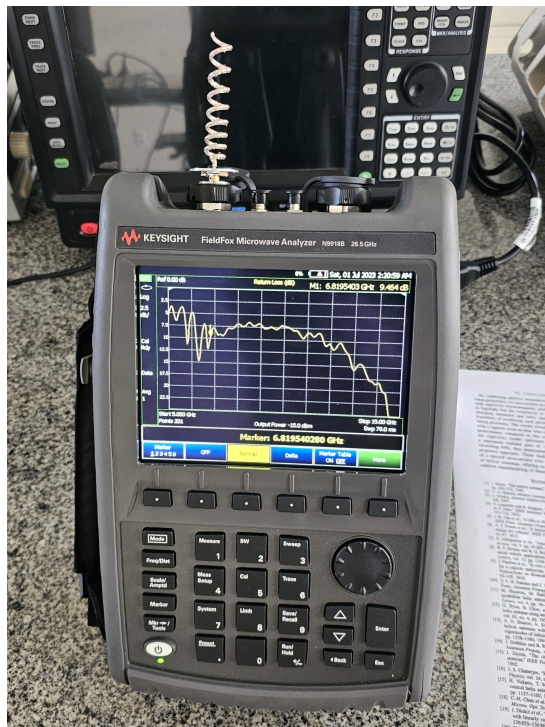
(b) Após a Aplicação da Tinta.

Fonte: Elaborada pelo Autor.

4.1.4 Resultados da Primeira Medição

A Figura 20 mostra a medição da antena de tipo II, a qual apresentou resultados que superaram as expectativas iniciais por demonstrarem compatibilidade de comportamento da curva de $|S_{11}|$ com a referência, levando em consideração as imperfeições observadas em sua estrutura.

Figura 20 — Primeira Medição no Analisador de Espectro.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

4.2 Montagem das Antenas Produzidas por SLS

Algumas amostras produzidas por SLS também apresentaram certa dificuldade na fixação do conector SMA, em parte devido a problemas na base originados por uma imperfeição no modelo 3D das antenas de tipo II enviado para impressão. Vale ressaltar que o método de impressão por sinterização seletiva a laser é um método de precisão significativamente maior e que não necessita de suporte, sendo uma ótima opção para a fabricação de antenas de geometria complexa, como as helicoidais abordadas neste trabalho.

O nível de precisão elevada permite que esse método de manufatura aditiva alcance uma uniformidade superficial e uma qualidade final superiores quando comparadas às demais antenas observadas até então, como fica evidente na Figura 21, que mostra antenas de modelos II e III produzidas por SLS, após serem metalizadas e devidamente montadas.

Figura 21 — Antenas Produzidas por SLS Devidamente Montadas.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

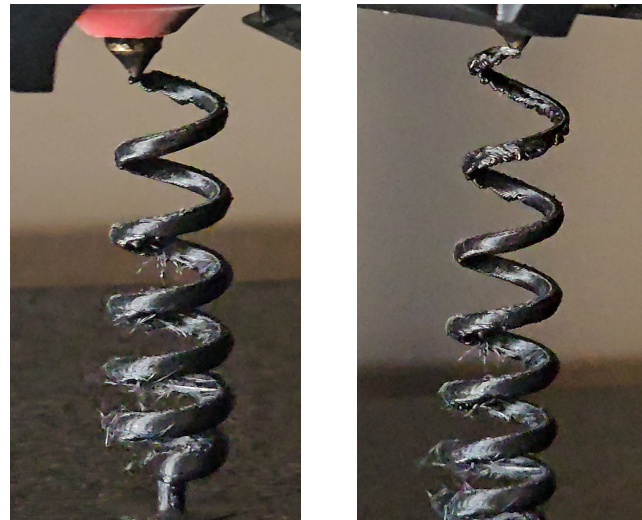
4.3 Resultados da Segunda Etapa de Otimização de Impressão das Antenas Helicoidais

4.3.1 Otimização de Impressão das Antenas de Modelo III

Esse processo revelou-se trabalhoso e iterativo. Os resultados iniciais foram insatisfatórios, com falhas frequentes que interrompiam as impressões antes de sua conclusão. A Figura 22 apresenta capturas de tela de uma gravação utilizada para analisar os motivos de certos padrões de defeitos, já após algumas iterações. Nela, ficou evidente o efeito de

arrasto do bico extrusor, intensificado nas camadas mais altas. Além disso, as “teias” e parte dos defeitos estavam ocorrendo devido a valores inadequados de *Z-hop* e retração, sendo este um exemplo de caso em que as modificações da iteração causaram uma piora no resultado obtido.

Figura 22 — Processo de Impressão com Poucas Iterações de Parâmetros.



(a) Verificação da Origem dos Defeitos.

(b) Análise de Padrões e Arrasto pelo Bico.

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Após algumas iterações, foi possível obter as primeiras impressões completas com bons resultados a partir desta nova etapa, mas ainda não com repetibilidade. A Figura 23 apresenta a finalização da impressão da antena com o melhor resultado. De forma geral, as peças ainda apresentavam certos defeitos distintos e pontuais, como irregularidades ao longo da superfície e inconsistências na base ou na ponta, que muitas vezes causavam o preenchimento do furo de fixação.

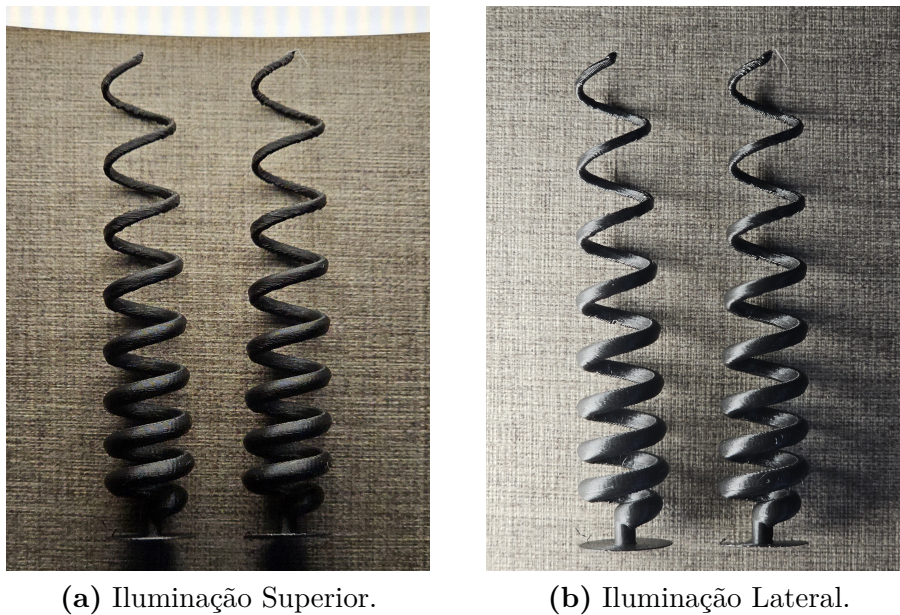
Figura 23 — Impressão Após as Iterações Iniciais.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Por meio do processo de iterações sucessivas, obteve-se uma qualidade de impressão considerada ótima, levando em conta as limitações do método FDM e as pequenas dimensões. A Figura 24 apresenta esses resultados finais, variando a iluminação para viabilizar uma melhor análise da qualidade superficial. As antenas impressas apresentaram algumas imperfeições leves, mas o resultado geral foi considerado adequado, ainda mais considerando o fato de que o processo de metalização posterior cobriria consideravelmente a maior parte dessas pequenas imperfeições. Além disso, um processo de acabamento pode ser utilizado para corrigir parte delas antes da metalização.

Figura 24 — Resultados Finais de Impressão para Antenas de Modelo III.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

4.3.2 Soluções de Impressão das Antenas de Modelos I e II

Em relação aos tipos de suporte testados, o de tipo árvore (orgânico) resultava em grande desperdício de material, remoção difícil e danos estruturais nas espiras, principalmente nas extremidades, conforme também observado nos testes realizados no laboratório de materiais da Universidade. Em contrapartida, a utilização de suporte do tipo Normal, em sua configuração Linear, apresentou, desta vez, melhores resultados na estabilidade e na qualidade superficial. No entanto, o suporte ainda era de difícil remoção, como demonstra a Figura 25, e causava algumas imperfeições na superfície.

A variação do suporte Normal, denominada *Snug*, e a configuração de seus parâmetros permitiram a geração de estruturas de sustentação apenas entre as espiras, conferindo estabilidade durante a impressão, enquanto reduziam a quantidade de material dedicada a essa finalidade.

Figura 25 — Antena de Tipo II e seus Restos de Suporte.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Após algumas iterações, o resultado alcançado foi uma impressão estável, com qualidade superficial adequada e com retrabalho mínimo para acabamento após a retirada do suporte, que se tornou de fácil remoção e de natureza análoga ao descascar de uma laranja, podendo ser retirado ao puxá-lo em espiral, conforme demonstrado na Figura 26.

Figura 26 — Remoção do Suporte *Snug*.



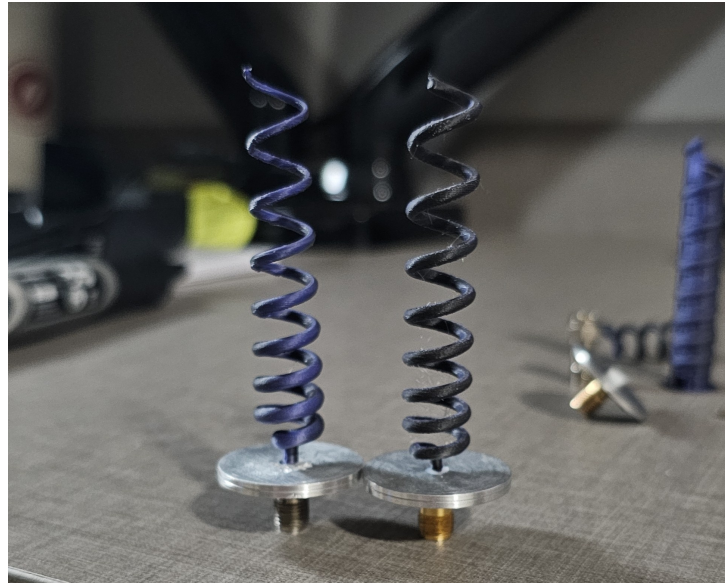
Fonte: Elaborada pelo Autor.

A impressão das antenas de modelos I e II rotacionadas em 180° , com a base da antena orientada para cima, no eixo Z, resultou em melhor consistência na impressão da base, sem preenchimento do furo central, possivelmente pela eliminação da influência da temperatura da mesa de impressão e pela menor quantidade de material depositado, viabilizando condições para a solidificação adequada das camadas da base. A utilização

do recurso *Raft* afastou a extremidade da antena da mesa de impressão, evitando as deformações que eram observadas quando havia contato direto entre elas.

A Figura 27 apresenta antenas de modelos II e III antes da metalização, sendo possível observar a qualidade e a uniformidade superficial obtidas com as configurações finais.

Figura 27 — Montagem de Antenas de Modelos II e III.



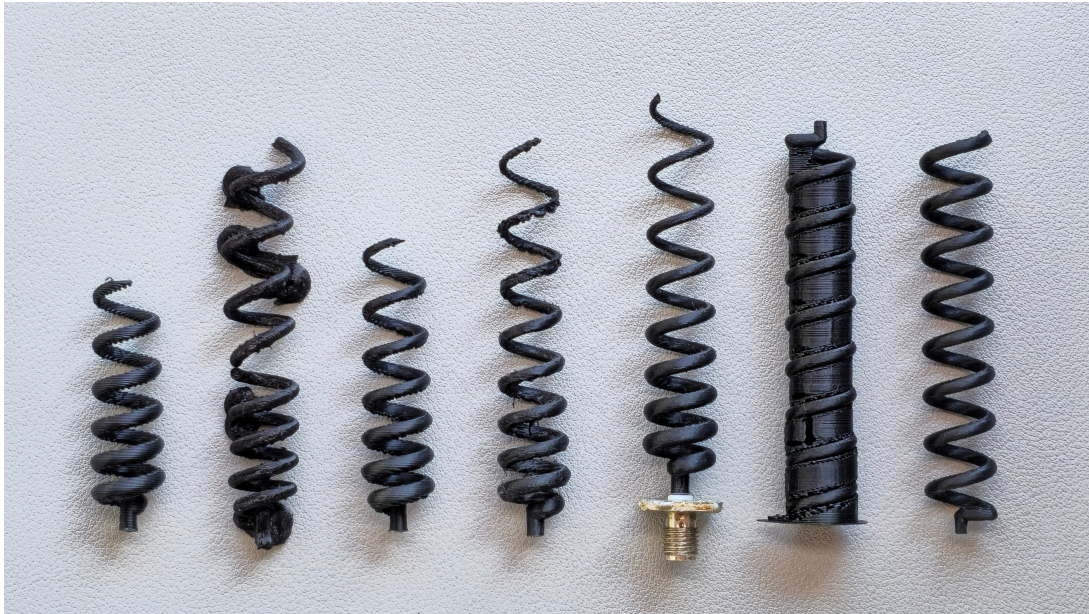
Fonte: Elaborada pelo Autor.

4.4 Qualidade Final da Impressão FDM Obtida para as Antenas

A busca por uma qualidade final satisfatória para a impressão FDM das antenas helicoidais exigiu a experimentação de diversos recursos, além do ajuste de parâmetros convencionais, como a utilização de diferentes orientações das peças, tipos de suporte e o uso de *raft* e *Brim*. Esses ajustes mostraram-se essenciais para contornar os desafios que surgiram com as limitações da impressão FDM quando utilizada para geometrias complexas e de pequenas dimensões, como as das antenas propostas.

Ao longo dessas iterações, ficou evidente a melhoria progressiva na qualidade estrutural das antenas, o que possibilitou a obtenção de antenas visualmente mais uniformes, com redução de deformações em camadas mais altas e repetibilidade satisfatória entre cada impressão. O conjunto final de configurações desenvolvido encontra-se descrito no Apêndice A. A Figura 28 apresenta uma evolução da qualidade geral de impressão ao longo do trabalho.

Figura 28 — Evolução da Qualidade de Impressão das Antenas.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

4.5 Resultados das Medições de Caracterização pela Magnitude do Coeficiente de Reflexão

Nesta seção, são apresentados os resultados experimentais de $|S_{11}|$ medidos em laboratório por meio do Analisador de Espectro *FieldFox* N9918B da *Keysight*. Para cada modelo, é apresentada inicialmente uma figura obtida do artigo de referência (PENCHEL *et al.*, 2024), que contém uma representação da curva da resposta simulada e da resposta da antenna metálica produzida por manufatura aditiva em metal, seguida de outra figura que representa os resultados obtidos nas medições deste trabalho. Essa disposição permite uma comparação direta entre os diferentes métodos de manufatura.

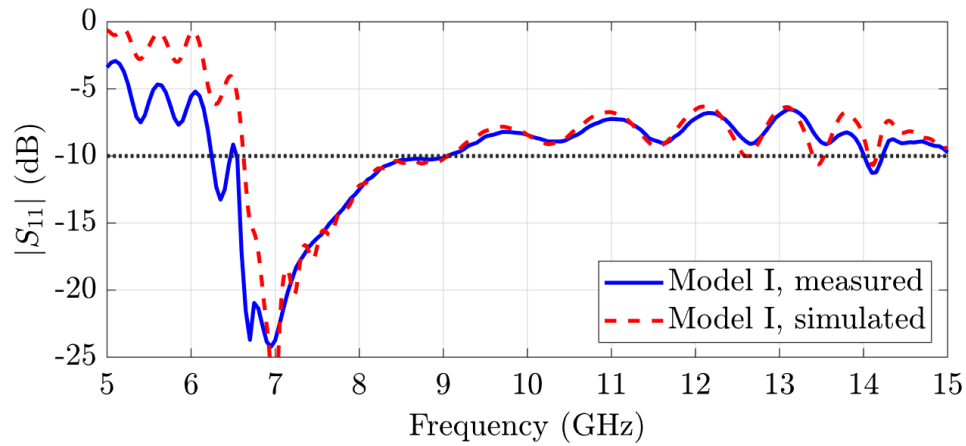
4.5.1 Antenas de Modelo I

A Figura 29 apresenta as curvas utilizadas como referência obtidas do artigo de Penchel *et al.* (2024) para o Modelo I, contendo a resposta simulada (em vermelho) e a resposta medida referente à antenna produzida por manufatura aditiva metálica (em azul).

A Figura 30 apresenta os resultados das medições de $|S_{11}|$ obtidos neste trabalho para três antenas de tipo I fabricadas por impressão FDM e metalização por aplicação de tinta condutiva. Ela inclui também uma nova medição para a antenna produzida por manufatura aditiva em metal.

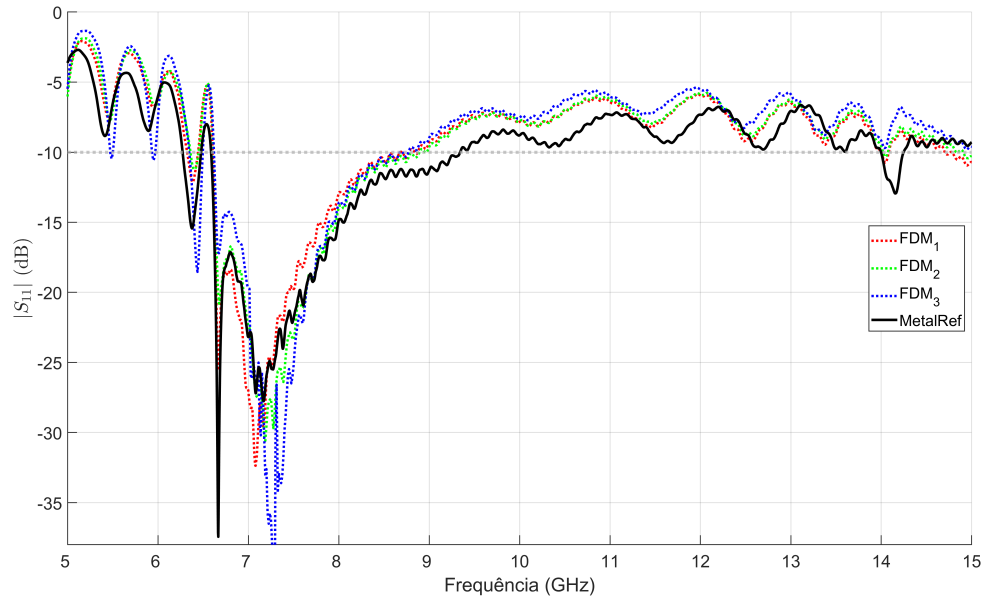
Ao comparar as curvas de ambos os gráficos, nota-se que as três amostras fabricadas em polímero por FDM apresentaram um comportamento geral consistente entre elas e semelhante ao que foi apresentado pela antenna metálica do trabalho de referência, uma vez

Figura 29 — Modelo I - Curvas de Referência.



Fonte: Penchel *et al.* (2024)

Figura 30 — Modelo I - Curvas das Medições de $|S_{11}|$ em Laboratório.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

que as curvas das três amostras em FDM acompanharam o desempenho observado para a antena metálica e a simulação com proximidade, levando em consideração as limitações da impressão 3D por FDM.

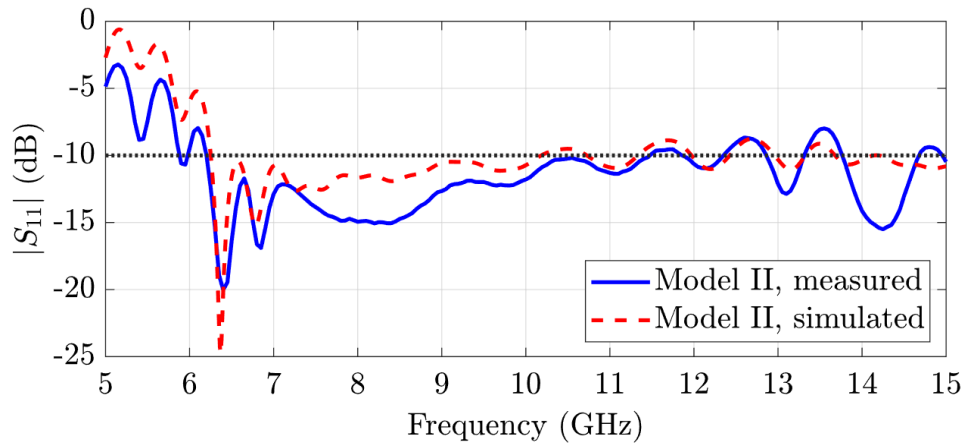
Este primeiro conjunto de resultados experimentais revela uma boa repetibilidade geral e demonstra que o conjunto de configurações otimizadas desenvolvido para a impressão dessas antenas foi suficiente para gerar resultados compatíveis com o funcionamento previsto para antenas de modelo I.

4.5.2 Antenas de Modelo II

Para as antenas de modelo II, foi realizada uma análise sobre o desempenho das amostras fabricadas por meio de Sinterização a Laser Seletiva (SLS) metalizadas com a tinta condutiva 843WB da *MG Chemicals*. A Figura 31 apresenta as curvas de referência, com a resposta simulada (em vermelho) e a medição da antenna fabricada em metal (em azul).

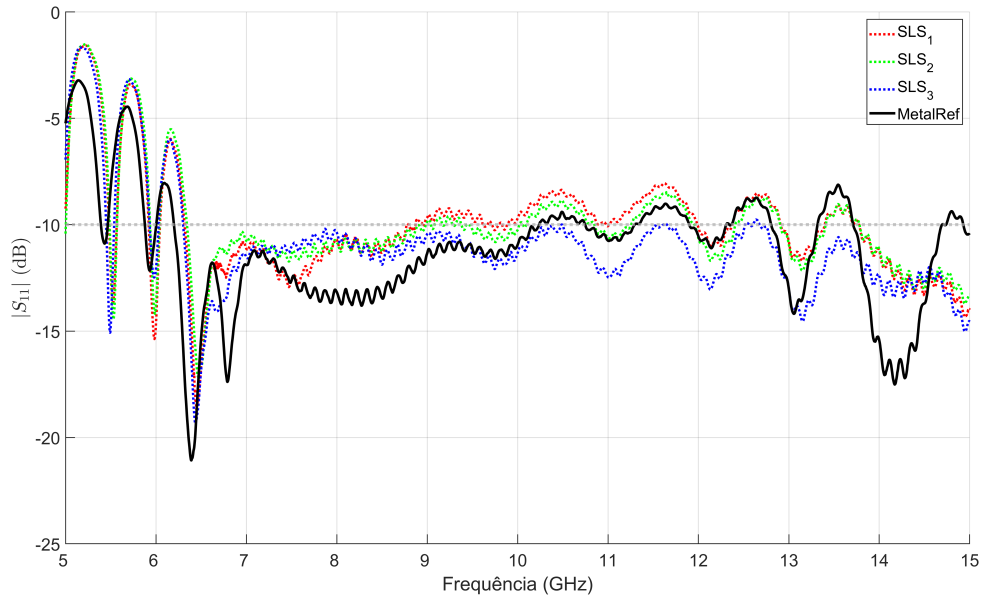
A Figura 32 contém as curvas dos resultados referentes a três amostras de antenas de tipo II fabricadas por SLS, assim como uma nova medição para a antenna fabricada por manufatura aditiva de metais.

Figura 31 — Modelo II - Curvas de Referência.



Fonte: Penchel *et al.* (2024)

Figura 32 — Modelo II - Curvas das Medições de $|S_{11}|$ em Laboratório.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

As três antenas produzidas pela manufatura de SLS exibiram resultados com curvas muito próximas da curva obtida por simulação, apresentando coerência com a

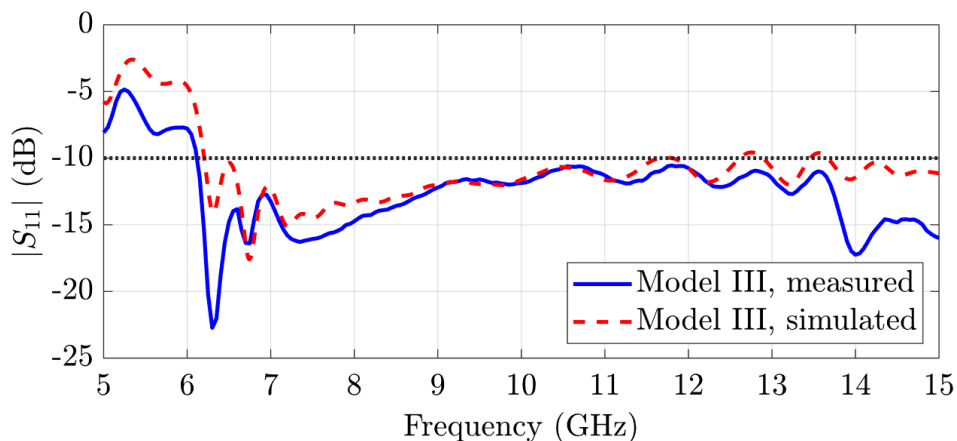
antena metálica, fator que reflete a alta precisão dimensional do método de fabricação por Sinterização a Laser Seletiva. Esses resultados ressaltam ainda a viabilidade da tinta condutiva como um método efetivo de metalização para este fim.

4.5.3 Antenas de Modelo III

Para as antenas de modelo III, são apresentadas medições de amostras fabricadas por meio dos três métodos de fabricação apresentados, permitindo uma análise comparativa mais completa entre eles, mostrando como cada processo de fabricação pode influenciar o comportamento eletromagnético das antenas. A Figura 33 apresenta as curvas de referência, sendo a vermelha obtida por simulação e a azul por medição da antena metálica.

A Figura 34 apresenta os resultados das medições de $|S_{11}|$ realizadas em laboratório para três amostras de antenas produzidas por SLS, enquanto a Figura 35 apresenta os resultados referentes à quatro antenas de polímero PLA impressas por FDM. Ambas incluem uma nova medição para a antena fabricada por manufatura aditiva metálica.

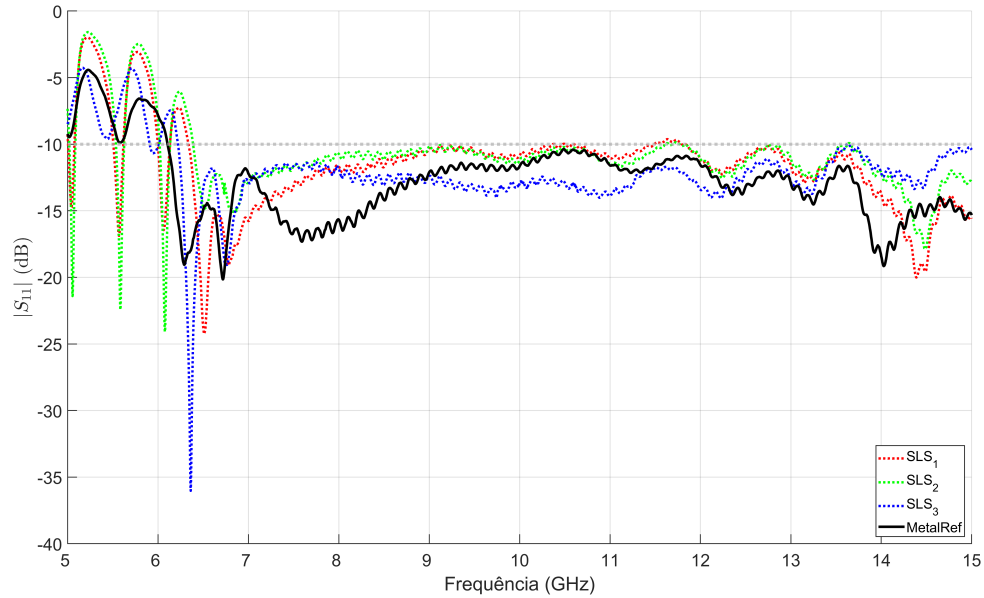
Figura 33 — Modelo III - Curvas de Referência.



Fonte: Penchel *et al.* (2024)

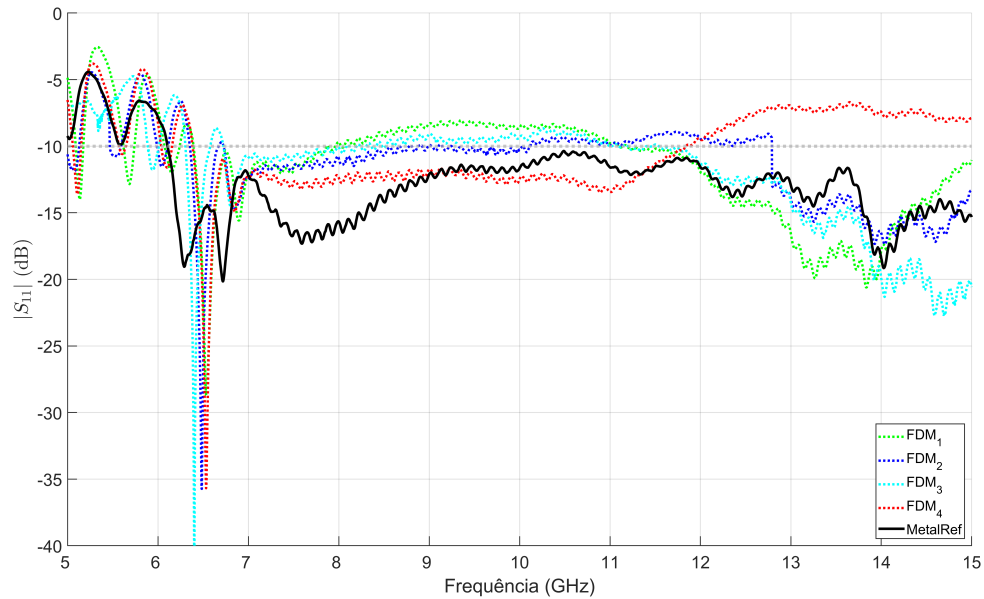
Conforme mencionado, o Modelo III apresenta o conjunto de resultados mais abrangente, pois reúne medições de amostras obtidas pelos três métodos de manufatura considerados. Essa diversidade de amostras permite uma avaliação experimental mais completa da caracterização de cada antena, assim como uma comparação mais consistente entre as técnicas utilizadas para a construção das antenas helicoidais. De maneira geral, as curvas obtidas apresentaram respostas compatíveis com o comportamento esperado para o Modelo III, ainda que algumas tenham demonstrado um alinhamento mais próximo às referências do que outras, com desempenho levemente inferior. A comparação do desempenho relativo das antenas de cada método de fabricação é discutida na seção seguinte.

Figura 34 — Modelo III - Curvas das Medições de $|S_{11}|$ das Amostras Produzidas por SLS.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Figura 35 — Modelo III - Curvas das Medições de $|S_{11}|$ das Amostras Produzidas por FDM.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

4.6 Comparação entre os Métodos de Manufatura Testados

A análise conjunta das curvas de $|S_{11}|$ para cada modelo de antena helicoidal revela alguns detalhes importantes quanto às características de construção e à natureza dos materiais de cada método. As antenas fabricadas por manufatura aditiva de metal foram utilizadas como referência devido à proximidade de suas medições com os resultados de simulação, apesar de apresentarem seus próprios desvios. Novas medições foram realizadas

com elas para este trabalho, visando viabilizar uma comparação visual mais direta das amostras com a referência.

O método de manufatura aditiva de metal gera peças com precisão dimensional superior e completamente metálicas, sem a necessidade de aplicação de uma camada de tinta condutiva, a qual pode ser não uniforme. Estes pontos contribuem para perdas reduzidas, para um melhor casamento de impedâncias e, por consequência, conferem às antenas de metal sua proximidade elevada ao resultado obtido por simulação.

As antenas que foram produzidas através do método de Sinterização a Laser Seletiva (SLS) compartilham da precisão dimensional superior, inerente ao método de fabricação. Devido à isso, o comportamento esperado para as amostras obtidas por esse meio era que apresentassem curvas de $|S_{11}|$ consistentes entre as peças e também próximas da referência. As curvas observadas nas respostas das antenas de modelos II e III (Figura 32 e Figura 34) mostram que há certa variação entre as amostras produzidas em SLS, mas o comportamento geral apresenta resultados compatíveis com a simulação.

Devido às limitações impostas pela fabricação por impressão FDM quanto à produção das antenas, e ainda com a precisão dimensional inferior em relação aos outros métodos de obtenção das amostras, o resultado final para essas antenas era uma incógnita. No entanto, os resultados das medições do coeficiente de reflexão foram, de maneira geral, compatíveis e apenas levemente inferiores à referência. Foi ainda possível observar consistência nas curvas entre as amostras, como pôde ser visto principalmente na Figura 30, que apresenta as curvas das antenas de modelo I.

4.7 Considerações Finais sobre os Resultados

Os resultados das amostras demonstraram a eficácia da metalização por tinta condutiva para viabilizar a irradiação das antenas helicoidais impressas em polímero PLA e em nylon, apresentando curvas de $|S_{11}|$ coerentes com a simulação. Em diversos momentos, as curvas ficaram muito próximas da antena metálica de referência, validando o método de metalização adotado.

O desempenho ligeiramente inferior e as diferenças observadas nos resultados das antenas produzidas por impressão FDM podem ser explicados por uma combinação de fatores:

- Limitações na precisão geométrica inerentes ao método de fabricação. A impressão por FDM não apresenta alta precisão dimensional, fator que é ainda agravado quando utilizada para a produção de peças de tamanhos tão reduzidos. As peculiaridades da geometria das antenas helicoidais, em especial as espiras com diâmetros reduzidos pela seção transversal não uniforme do modelo III, a base estreita contendo uma

cavidade e a presença constante de *overhangs*, tornam o alcance de uma impressão fiel ao modelo original ainda mais desafiador.

- Pequenas irregularidades na superfície e assimetrias, oriundas das dificuldades no processo de impressão e eventualmente ocasionadas pelo método de aplicação da tinta condutiva adotado à mão, com a utilização de um pincel.
- Variações na montagem da estrutura das antenas para medição, principalmente na fixação da base da antena no pino central do conector SMA. Durante a etapa de medição, ficou evidente que algumas antenas apresentavam maior dificuldade nessa fixação. Consequentemente, isso gerou diferenças nas distâncias entre a base da antena e o disco do plano terra durante as medições. Essa imprecisão impacta o casamento de impedâncias, explicando parte das variações observadas nas curvas das medições de $|S_{11}|$. Essa dificuldade de fixação da estrutura também existiu para amostras produzidas por SLS. Portanto, este é um ponto a ser buscada uma solução adequada no futuro.

Contudo, apesar dessas limitações, as antenas produzidas por meio de FDM e metalizadas pela aplicação de tinta condutiva apresentaram resultados acima das expectativas iniciais, visto que seus resultados acompanharam as curvas de referência com certa proximidade. Isso demonstrou que o método, quando otimizado, é capaz de produzir antenas de geometrias complexas funcionais e com desempenho satisfatório.

5 Conclusão

O presente trabalho avaliou experimentalmente a viabilidade da fabricação de modelos de antenas helicoidais com ângulo de *pitch* não uniforme por meio da manufatura aditiva de impressão 3D FDM e da metalização de superfície por aplicação de tinta condutiva. Essa proposta surgiu da busca por alternativas de maior acessibilidade e menor custo quando comparadas à manufatura aditiva de metais adotada no trabalho de referência (PENCHEL *et al.*, 2024), que, apesar de ser capaz de reproduzir modelos com alta precisão dimensional e condutivos, demanda equipamentos de nível industrial e apresenta custo elevado, acarretando uma disponibilidade limitada em ambientes acadêmicos e de pesquisa.

A metodologia experimental apresentada neste trabalho permitiu, através de diversas iterações, identificar e contornar limitações intrínsecas ao processo de impressão 3D FDM, em especial as relacionadas à menor precisão dimensional para lidar com amostras de tamanho reduzido, à geometria helicoidal complexa das antenas compostas de overhangs constantes e à característica delicada das bases contendo a cavidade para fixação no conector SMA. Recursos como a orientação adequada, o suporte do tipo *Snug*, o uso de *raft* e *brim*, bem como a otimização dos parâmetros convencionais de impressão, como temperatura, fluxo, retração, *z-hop*, velocidades e geração de suportes, mostraram-se essenciais para alcançar peças estruturalmente uniformes e consistentes.

Os resultados experimentais revelaram que as antenas fabricadas por FDM e metalizadas com tinta condutiva apresentaram curvas de $|S_{11}|$ próximas às das antenas produzidas por manufatura aditiva metálica e por sinterização a laser seletiva, o que demonstrou a possibilidade de alcançar um desempenho eletromagnético adequado e boa repetibilidade para esta metodologia com finalidade em antenas. Embora ainda apresentem desempenho levemente inferior e certas variações pontuais associadas às limitações do método FDM, as medições das amostras, inclusive das produzidas por SLS, confirmaram a eficácia do processo de metalização por tinta condutiva.

Dessa forma, conclui-se que a metodologia proposta, que combina impressão 3D por FDM e metalização das amostras por tinta condutiva, representa uma alternativa viável, de baixo custo e eficaz para a fabricação de antenas helicoidais de geometria complexa, com capacidade de apresentar desempenho eletromagnético consistente e próximo ao observado com técnicas de alta precisão e custo elevado. Assim, o método adotado demonstrou potencial para tornar processos de prototipagem, estudos experimentais e fabricação de antenas com geometrias avançadas mais acessíveis, contribuindo especialmente em ambientes de ensino e pesquisa.

Referências

BALANIS, C. *Antenna Theory: Analysis and Design*. John Wiley & Sons, 2005. (Jeff borrow list). ISBN 9780471667827. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=agWwQgAACAAJ>>. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 17.

CREALITY. *Ender-3 V3 KE 3D Printer User Manual*. [S.l.], 2023. Acesso em: 8 dez. 2025. Disponível em: <<https://cdn.creality.com/ow/official/8b3ce46c-754d-4a8c-b5c2-8003b9f5e374.pdf>>. Citado na página 24.

CREALITY. *Ender-3 Pro 3D Printer*. 2025. <<https://www.creality.com/products/ender-3-pro-3d-printer>>. Acesso em: 8 dez. 2025. Citado na página 24.

FRAZIER, W. E. Metal additive manufacturing: A review. *J. Mater. Eng. Perform.*, v. 23, n. 6, p. 1917–1928, 2014. Citado na página 20.

GHASSEMIPARVIN, B.; GHALICHECHIAN, N. Design, fabrication, and testing of a helical antenna using 3d printing technology. *Microwave and Optical Technology Letters*, v. 62, n. 4, p. 1577–1580, 2020. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/mop.32184>>. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 22.

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. 2. ed. Nova Iorque, NY, USA: Springer, 2014. Citado na página 21.

KRAUS, J. The helical antenna. *Proceedings of the IRE*, v. 37, n. 3, p. 263–272, 1949. Citado na página 13.

KRAUS, J. D.; WILLIAMSON, J. C. Characteristics of helical antennas radiating in the axial mode. *Journal of Applied Physics*, v. 19, n. 1, p. 87–96, 01 1948. ISSN 0021-8979. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/1.1697878>>. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 17.

LALLI, M. G. *Design de Antenas Helicoidais Para Operação na Banda X*. TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Estadual Paulista (UNESP), São João da Boa Vista - São Paulo, 2021. Citado 4 vezes nas páginas 13, 14, 15 e 18.

LAQUERBE, V.; FRAGNIER, R. Metallic s-band antenna for satellite tt&c links. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, v. 21, n. 4, p. 715–719, 2022. Citado na página 13.

MENON, A. M.; S, S. K. Optimum design of axial mode helical antenna with nonlinear pitch profile modeled using catmull-rom spline and particle swarm optimization. In: *2011 International Conference on Communications and Signal Processing*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 146–150. Citado 3 vezes nas páginas 14, 15 e 18.

MESQUITA, M. D. S.; D’ASSUNÇÃO, A. G.; OLIVEIRA, J. B. L.; BATISTA, Y. M. V. A new conductive ink for microstrip antenna and bioinspired fss designs on glass and fiberglass substrates. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic*

Applications, Sociedade Brasileira de Microondas e Optoeletrônica e Sociedade Brasileira de Eletromagnetismo, v. 18, n. 2, p. 227–245, Jun 2019. ISSN 2179-1074. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/2179-10742019v18i21554>>. Citado na página 22.

MILLIGAN, T. *Modern Antenna Design*. Wiley, 2005. (IEEE Press). ISBN 9780471720607. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=PPyDQXAd09kC>>. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 18.

OLADELE, O. K. *Impact of Telecommunications on Global Economic Development*. [S.l.]: ResearchGate, 2024. Citado na página 13.

OrcaSlicer. *OrcaSlicer Wiki*. 2025. <<https://github.com/OrcaSlicer/OrcaSlicer/wiki>>. Acesso em: 8 dez. 2025. Citado na página 32.

PENCHEL, R. A.; MARTINS, N. F.; ALDAYA, I.; OLIVEIRA, J. A. de; SANTOS, M. P. dos; JARDINI, A. L.; AVILA, J.; ROSA, G. S. Performance evaluation of a novel monofilar helical antenna with tapered cross-section wire fabricated via metal additive manufacturing. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, v. 175, 2024. Citado 12 vezes nas páginas 14, 15, 16, 18, 19, 20, 25, 47, 48, 49, 50 e 54.

POZAR, D. *Microwave Engineering*. Wiley, 2012. ISBN 9781118213636. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=JegbAAAAQBAJ>>. Citado na página 31.

SANTANA, L.; ALVES, J. L.; NETTO, A. d. C. S.; MERLINI, C. Estudo comparativo entre petg e pla para impressão 3d através de caracterização térmica, química e mecânica. *Matéria (Rio de Janeiro)*, Laboratório de Hidrogênio, Coppe - Universidade Federal do Rio de Janeiro, em cooperação com a Associação Brasileira do Hidrogênio, ABH2, v. 23, n. 4, p. e12267, 2018. ISSN 1517-7076. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1517-707620180004.0601>>. Citado na página 22.

SANTANA, L.; MERLINI, C.; BARRA, G. M. de O.; AHRENS, C. H.; NETTO, A. da C. S. Avaliação da composição química e das características térmicas de filamentos de pla para impressoras 3D de código aberto. In: *Anais do IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*. Rio de Janeiro, Brazil: ABCM Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2016. Citado na página 22.

SANTOS, P. L.; AVILA, J. A.; da Fonseca, E. B.; GABRIEL, A. H.; JARDINI, A. L.; LOPES Éder S. Plane-strain fracture toughness of thin additively manufactured maraging steel samples. *Additive Manufacturing*, v. 49, p. 102509, 2022. ISSN 2214-8604. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860421006564>>. Citado na página 20.

VOLAKIS, J. L. *Antenna Engineering Handbook*. [S.l.]: McGraw-Hill Companies, 2007. Citado na página 13.

VOOLT3D. *Filamento PLA Preto Velvet Premium*. 2025. <<https://voolt3d.com.br/produtos/filamento-pla-preto-velvet-premium/>>. Acesso em: 8 dez. 2025. Citado na página 29.

APÊNDICE A — Configurações Finais de Impressão.

Neste apêndice, encontram-se as configurações relevantes de impressão utilizadas para a obtenção da qualidade final de cada modelo de antena helicoidal. É importante destacar que a reprodução direta dos parâmetros não garante necessariamente os resultados observados neste trabalho, uma vez que cada modelo de impressora 3D e filamento terão seus próprios valores ideais. Contudo, essas configurações podem ser uma referência útil como um bom ponto de partida. Vale ressaltar que a *Wiki* do *OrcaSlicer* viabilizou a compreensão do funcionamento de cada recurso e parâmetro disponível no *software* fatiador, auxiliando nas tomadas de decisão ao longo das iterações.

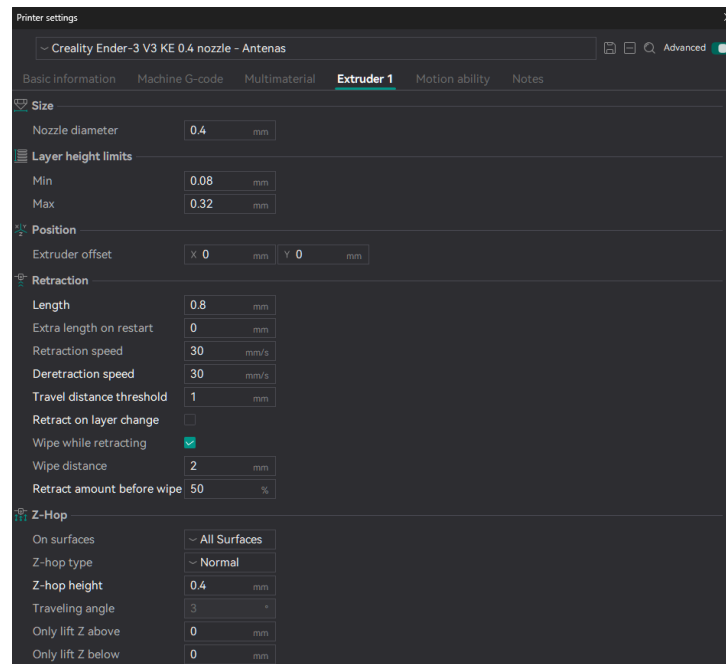
A.1 Configurações da Impressora Ender 3 V3 KE e do Filamento.

Durante o trabalho, todas as impressões foram realizadas utilizando um bico de 0,4 milímetros. A Figura A.1 apresenta os valores utilizados na configuração da impressora, especificamente na guia relacionada à extrusão. Em relação ao filamento, utilizou-se 215°C para a temperatura do bico e uma temperatura levemente reduzida de 50°C para a temperatura da mesa, com refrigeração a 100% após a conclusão da primeira camada. Para seus parâmetros mais específicos, como fluxo e *pressure advance*, recomenda-se a realização de uma etapa de calibração para alcançá-los, a qual pode ainda sugerir modificações em configurações de retração e outras, visto que cada variação de PLA terá seus próprios valores ideais, tornando essa etapa de grande importância, juntamente com a calibração da impressora, visando garantir um bom nivelamento da mesa de impressão.

A.2 Parâmetros da Antena de Modelo III.

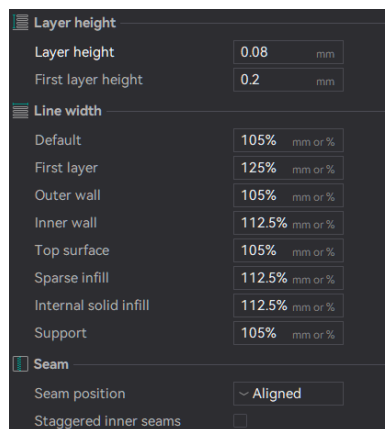
Referente às configurações do processo de impressão da antena de tipo III, na aba 'Qualidade' foram definidos os valores apresentados na Figura A.2, sendo utilizado um valor de 0,1 milímetro para a compensação de buracos no plano XY, com *precise wall* ligado, gerador de paredes do tipo *Arachne* com *Detect Overhang Walls* ativado e ordem de impressão de paredes *Inner/Outer*, adequados para lidar com os *overhangs* constantes das antenas. Foi utilizado *Brim* com largura de 5 milímetros para auxiliar a fixação da antena na mesa de impressão. Nota-se que é necessário o tipo *Outer brim only* para evitar que o furo da base da antena seja preenchido. As impressões foram feitas utilizando 3 *wall loops*, sem utilizar preenchimento.

Figura A.1 — Configurações de Extrusão.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Figura A.2 — Antena III - Configurações da Aba Qualidade.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

As configurações de velocidade utilizadas para as antenas de modelo III estão apresentadas na Figura A.3, que mostra os parâmetros de velocidade das camadas, e na Figura A.4, que mostra os valores das velocidades relacionadas às regiões de *overhang*.

Alternativamente, se optada a utilização de suporte na impressão das antenas de modelo III, podem ser utilizados os mesmos parâmetros das antenas II e III, com um *Threshold angle* reduzido (por volta de 18°) para o suporte *Snug*, o que faz com que apenas as partes mais afinadas da extremidade superior da antena imprima sem suporte, garantindo estabilidade ao longo da impressão mas sem comprometer a qualidade superficial das partes mais finas.

Figura A.3 — Antena III - Parâmetros de Velocidade das Camadas.

First layer speed	
First layer	50 mm/s
First layer infill	105 mm/s
Initial layer travel speed	100% mm/s or %
Number of slow layers	0 layers
Other layers speed	
Outer wall	40 mm/s
Inner wall	50 mm/s
Small perimeters	50% mm/s or %
Small perimeters threshold	0 mm
Sparse infill	50 mm/s
Internal solid infill	50 mm/s
Top surface	40 mm/s
Gap infill	8 mm/s

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Figura A.4 — Antena III - Velocidades em Regiões de overhang.

Overhang speed									
Slow down for overhangs	☒								
Slow down for curled perimeters	☒								
Overhang speed	<table border="1"> <tr> <td>0 mm/s or %</td> <td>(10%, 25%)</td> </tr> <tr> <td>10 mm/s or %</td> <td>(25%, 50%)</td> </tr> <tr> <td>8 mm/s or %</td> <td>(50%, 75%)</td> </tr> <tr> <td>5 mm/s or %</td> <td>(75%, 100%)</td> </tr> </table>	0 mm/s or %	(10%, 25%)	10 mm/s or %	(25%, 50%)	8 mm/s or %	(50%, 75%)	5 mm/s or %	(75%, 100%)
0 mm/s or %	(10%, 25%)								
10 mm/s or %	(25%, 50%)								
8 mm/s or %	(50%, 75%)								
5 mm/s or %	(75%, 100%)								
Bridge	<table border="1"> <tr> <td>65 mm/s</td> <td>External</td> </tr> <tr> <td>150% mm/s or %</td> <td>Internal</td> </tr> </table>	65 mm/s	External	150% mm/s or %	Internal				
65 mm/s	External								
150% mm/s or %	Internal								
Travel speed									
Travel	100 mm/s								

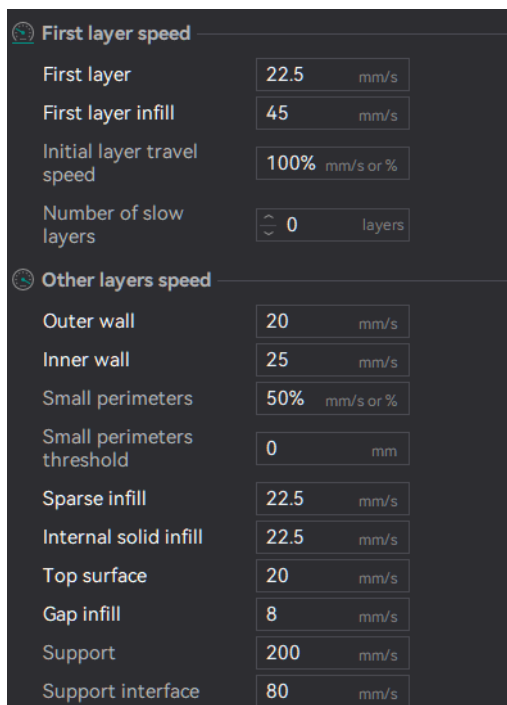
Fonte: Elaborada pelo Autor.

A.3 Parâmetros das Antenas de Modelos I e II.

Em relação às modificações entre os parâmetros apresentados da antena de modelo III para a utilização nos modelos I e II, pode-se destacar na aba 'Qualidade' a configuração de 0,4 milímetros para todos os valores de largura da linha, assim como a ativação dos recursos *Precise Z height*, *Reverse on even* e *Reverse only internal perimeters*. As velocidades das camadas foram reduzidas para valores apresentados na Figura A.5, com *travel speed* de 80 mm/s.

A implementação do suporte do tipo *Snug* foi realizado por meio das configurações apresentadas na Figura A.6, somado à modificação do parâmetro *Normal support expansion*, com melhor resultado obtido para o valor de -0,11 milímetros. Nota-se ainda a utilização de *Raft* para distanciar a ponta da antena, orientada para baixo nesse momento, visto que os modelos foram rotacionados em 180°.

Figura A.5 — Antenas I e II - Parâmetros de Velocidade das Camadas.

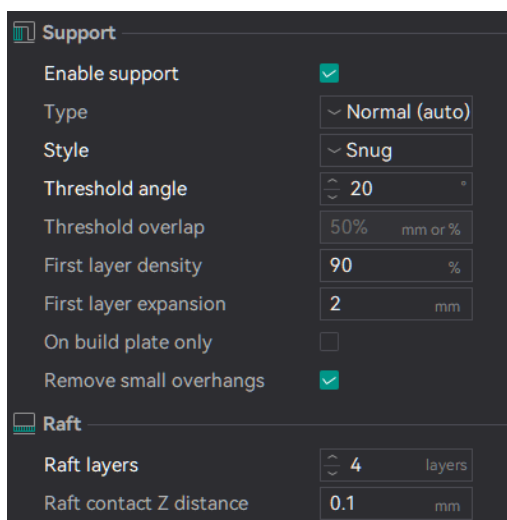


The image shows a settings panel for a 3D printer, divided into two sections: 'First layer speed' and 'Other layers speed'. The 'First layer speed' section includes settings for 'First layer' (22.5 mm/s), 'First layer infill' (45 mm/s), 'Initial layer travel speed' (100% mm/s or %), and 'Number of slow layers' (0 layers). The 'Other layers speed' section includes settings for 'Outer wall' (20 mm/s), 'Inner wall' (25 mm/s), 'Small perimeters' (50% mm/s or %), 'Small perimeters threshold' (0 mm), 'Sparse infill' (22.5 mm/s), 'Internal solid infill' (22.5 mm/s), 'Top surface' (20 mm/s), 'Gap infill' (8 mm/s), 'Support' (200 mm/s), and 'Support interface' (80 mm/s).

Section	Parameter	Value	Unit
First layer speed	First layer	22.5	mm/s
	First layer infill	45	mm/s
	Initial layer travel speed	100%	mm/s or %
	Number of slow layers	0	layers
Other layers speed	Outer wall	20	mm/s
	Inner wall	25	mm/s
	Small perimeters	50%	mm/s or %
	Small perimeters threshold	0	mm
	Sparse infill	22.5	mm/s
	Internal solid infill	22.5	mm/s
	Top surface	20	mm/s
	Gap infill	8	mm/s
	Support	200	mm/s
Support interface	80	mm/s	

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Figura A.6 — Antenas I e II - Parâmetros de Suporte.



The image shows a settings panel for a 3D printer, divided into two sections: 'Support' and 'Raft'. The 'Support' section includes settings for 'Enable support' (checked), 'Type' (Normal (auto)), 'Style' (Snug), 'Threshold angle' (20°), 'Threshold overlap' (50% mm or %), 'First layer density' (90%), 'First layer expansion' (2 mm), 'On build plate only' (unchecked), and 'Remove small overhangs' (checked). The 'Raft' section includes settings for 'Raft layers' (4 layers) and 'Raft contact Z distance' (0.1 mm).

Section	Parameter	Value	Unit
Support	Enable support	☒	
	Type	Normal (auto)	
	Style	Snug	
	Threshold angle	20	°
	Threshold overlap	50%	mm or %
	First layer density	90	%
	First layer expansion	2	mm
	On build plate only	☐	
Raft	Remove small overhangs	☒	
	Raft layers	4	layers
	Raft contact Z distance	0.1	mm

Fonte: Elaborada pelo Autor.

ANEXO A — Ficha Técnica da Tinta Condutiva.

Nesse anexo é apresentada a ficha técnica da tinta condutiva utilizada neste trabalho, a 843WB da *MG Chemicals*.

Figura A.1 — Ficha técnica da tinta condutiva 843WB (Página 1).

843WB Liquid



Electromagnetic Shielding Paint

843WB is a 1-part, water-based conductive paint, pigmented with highly conductive silver-coated copper flake. It is easy to use, with no let-down and no heat cure necessary. It adheres strongly to most injection-molded plastics, such as ABS, PBT and PVA. It also bonds well to drywall and can be painted over with common architectural paints.

843WB is designed to reduce EMI/RFI interferences in architectural and electronic applications.



Features & Benefits

- Provides excellent EMI/RFI shielding over a broad range of frequencies
- Non-flammable and no noxious odors
- Ships as a non-DG by air
- Low VOC content

Cured Properties

Resistivity	5.3 x 10 ⁻⁴ Ω-cm
Surface Resistance @ 50 µm	0.020 Ω/sq
Service Temperature Range	-40–120 °C

Usage Parameters

Recoat Time (plastic)	20 min
Recoat Time (drywall)	5 min
Cure Times	24 h @ 22 °C 2.5 h @ 65 °C
Recommended Film Thickness	50 µm
Minimum Film Thickness	30 µm
Theoretical Coverage @ 2 mil (based on 100% transfer efficiency)	47 040 cm ² /L

Available Packaging

Cat. No.	Packaging	Net Vol.	Net Wt.
843WB-55ML	Bottle	55 mL	72.8 g
843WB-850ML	Can	850 mL	1.12 kg
843WB-3.78L	Can	3.60 L	4.76 kg

Contact Information

MG Chemicals, 1210 Corporate Drive
Burlington, Ontario, Canada L7L 5R6
Email: support@mgchemicals.com
Phone: North America: +(1)800-340-0772
International: +(1) 905-331-1396
Europe: +(44)1663 362888

Uncured Properties

Viscosity @ 25 °C	660 cP
Density	1.32 g/mL
Percent Solids	42 %
Shelf Life	2.5 y
Calculated VOC	37 g/L

Figura A.2 — Ficha técnica da tinta condutiva 843WB (Página 2).

843WB Liquid



Application Instructions

Read the product SDS and Application Guide for more detailed instructions before using this product (downloadable at www.mgchemicals.com).

Recommended Preparation

Plastic—Clean the substrate with Isopropyl Alcohol, MG #824, so the surface is free of oils, dust, and other residues.

Drywall—For new drywall, apply directly on top of the drywall primer, after the primer has properly cured. When applying on top of existing paint, first wash the wall with a solution of T.S.P. diluted with water at a 1:10 ratio, to ensure good adhesion.

Paint Roller and Brush

Thinning is not required. Use a standard paint roller, foam brush or MG #855 horse hair brush.

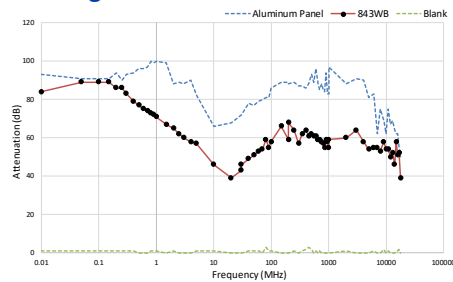
Manual Spray Guns

Use a standard fluid nozzle gun to spray the paint. The settings listed below are recommendations; however, performance will vary with different brands:

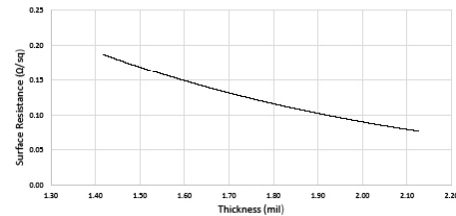
	LVMP	HVLP
Nozzle tip diameter	1.8 mm	1.8 mm
Inlet pressure	5–15 psi	5–15 psi
Air flow	10–15 SCFM	8.3 SCFM
Air cap	5–10 psi	5–10 psi

When using a pressure pot and agitator, keep the agitator at low mixing speed with air pressure of 20–50 psi. Use the lowest pressure necessary to keep the particles suspended.

Shielding Attenuation



Surface Resistance by Paint Thickness



Selective Coating

For higher volume applications, paint can be applied via selective coating equipment. Use a system with constant fluid recirculation to keep the particles from settling in the lines. The fluid nozzle must be 1.8 mm in diameter and 5–10 psi fluid pressure is recommended.

Cure Instructions

Allow to dry at room temperature for 24 hours, or after letting sit for 20 minutes, cure the paint in an oven for 2.5 hours @ 65 °C.

Clean-up

Clean the spray system and equipment with tap water after use.

Storage and Handling

Store between -20 and 27 °C in a dry area, away from sunlight (see SDS).

If exposed to freezing temperatures during storage or transport, keep product at room temperature for at least two days and ensure it is fully homogeneous prior to use.

Disclaimer

This information is believed to be accurate. It is intended for professional end-users who have the skills required to evaluate and use the data properly. M.G. Chemicals Ltd. does not guarantee the accuracy of the data and assumes no liability in connection with damages incurred while using it.