



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMIÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MILENA BEZERRA DE ALMEIDA

**ESTUDO DO USO DE MATERIAIS DE IMPRESSÃO 3D EM SUPERFÍCIES
SELETIVAS EM FREQUÊNCIA**

CARAÚBAS - RN

2021

MILENA BEZERRA DE ALMEIDA

**ESTUDO DO USO DE MATERIAIS DE IMPRESSÃO 3D EM SUPERFÍCIES
SELETIVAS EM FREQUÊNCIA**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semiárido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis Brito Filho

CARAÚBAS - RN

2021

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

AA447 Almeida, Milena Bezerra de.
e ESTUDO DO USO DE MATERIAIS DE IMPRESSÃO 3D EM
SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA / Milena
Bezerra de Almeida. - 2021.
42 f. : il.

Orientador: Francisco de Assis Brito Filho.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Elétrica, 2021.

1. Dispositivos de RF. 2. Impressão 3D. 3.
Superfícies Seletivas em Frequência. I. Brito
Filho, Francisco de Assis, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Dalvanira Brito Rodrigues
CRB: 15/700

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

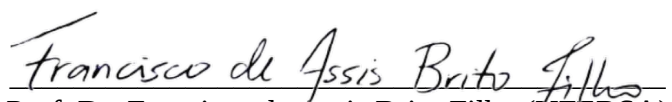
MILENA BEZERRA DE ALMEIDA

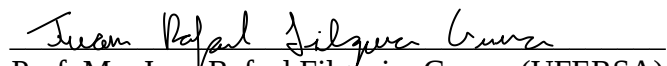
**ESTUDO DO USO DE MATERIAIS DE IMPRESSÃO 3D EM SUPERFÍCIES
SELETIVAS EM FREQUÊNCIA**

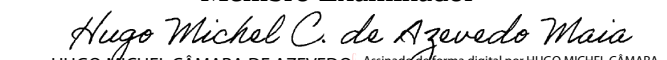
Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semiárido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Defendida em: 16/11/2021.

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Francisco de Assis Brito Filho (UFERSA)
Presidente


Prof. Me. Juan Rafael Filgueira Guerra (UFERSA)
Membro Examinador


HUGO MICHEL CÂMARA DE AZEVEDO
MAIA
Assinado digitalmente por HUGO MICHEL CÂMARA DE AZEVEDO MAIA
Dados: 2021.11.22 10:50:25 -03'00'
Prof. Dr. Hugo Michel Camara de Azevedo Maia (UFERSA)
Membro Examinador

Dedico a Deus e a todos que fizeram parte de
algum modo, para a conclusão deste curso.
Gratidão!

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sua infinita bondade e por ter me fortalecido e me amparado nas dificuldades e por ter me permitido alcançar esta etapa tão importante da minha vida.

Aos meus pais, Rita Maria de Almeida Medeiros e Bezerra e Marciel Eloi Bezerra, pelo amor, dedicação, suporte e ensino, que foram essenciais em toda a minha trajetória. A quem tenho muito amor!

Aos meus irmãos, João Marcos Bezerra de Almeida e Ramon Rogeris de Medeiros Bezerra e a toda minha família, pelo cuidado e apoio nessa trajetória.

Ao meu avô José Almeida (*In memoriam*), por tudo que me ensinou em vida.

Ao meu namorado, Fernando Thailson de Moraes Gama e melhor amigo, pelo apoio, amor, carinho e dedicação a mim.

Aos amigos que estiveram comigo nesse caminho, em especial a Maria Victória da Silva Oliveira por todo o carinho, ajuda e atenção.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Francisco de Assis Brito Filho, pela confiança e por todo o conhecimento repassado, a quem tenho muita admiração e respeito.

Por fim, agradeço a todo o corpo docente e funcionários da UFERSA, por todo o percurso da graduação. E a todas as pessoas que participaram de forma direta ou indireta para a conclusão desta graduação, toda a minha gratidão!

“Consagre ao senhor tudo o que você faz, e os
seus planos serão bem-sucedidos.”

Provérbios 16:3

RESUMO

Neste trabalho é proposto uma abordagem teórica sobre o uso de materiais de impressão 3D em Superfícies Seletivas em Frequência, sendo uma estrutura *Dual-band* do tipo rejeita-faixa, para operarem nas frequências de 2,4 GHz e 5,8 GHz. Com o avanço da impressão 3D no mercado, traz uma possibilidade para o seu uso em estruturas de dispositivos de radio-frequência, devido aos seus processos reduzidos e menores custos, podendo ser utilizado como substratos para superfícies seletivas em frequência. Para tanto, tendo conhecimento das constantes dielétricas dos materiais, sendo dois tipos de ABS e um tipo de PLA, simulou-se as estruturas no *software* ANSOFT HFSS, primeiramente somente os materiais para se averiguar a influência dos *patches* nas estruturas e em seguida, as FSSs com cada tipo de material. A forma do elemento para a análise foi escolhida por meio de testes, e viu-se que a combinação entre um *patch* retangular e um *patch* circular entregava uma resposta em frequência semelhante ao desejado. Os resultados obtidos pelas FSSs mostraram-se satisfatórios e demonstram a possibilidade do uso de materiais de impressão 3D como substrato de dispositivos de RF, visto que nas faixas de frequência propostas as estruturas operaram como um filtro rejeita-faixa, apresentando larguras de banda entre 0,62 à 0,9 GHz e para todas as estruturas as frequências de 2,4 GHz e 5,8 GHz estavam contidas nas bandas passantes.

Palavras-chave: ABS; Dispositivos de RF; Impressão 3D; Superfícies Seletivas em Frequência; PLA.

ABSTRACT

In this work is a theoretical approach was proposed on the use of 3D printing materials on Frequency Selective Surface, being a Dual-band structure of the band-reject type, to operate in the frequencies of 2.4 GHz and 5.8 GHz. With the advancement of 3D printing in the market, it brings a possibility for its use in radio-frequency device structures, due to its reduced processes and lower costs, and can be used as substrates for frequency selective surfaces. Therefore, having knowledge of the dielectric constants of materials, being two types of ABS and one type of PLA, the structures were simulated in ANSOFT HFSS software, first only the materials to check the influence of patches on structures and then, the FSSs with each type of material. The element form for the analysis was chosen through tests and it was seen that the combination of a rectangular patch and a circular patch delivered a Frequency response similar to the desired. The results obtained by the FSSs proved to be satisfactory and demonstrate the possibility of using 3D printing materials as a substrate for RF devices, since in the proposed Frequency ranges the structures operated as a band-reject filter, presenting bandwidths between 0.62 to 0.9 GHz and for all structures the 2.4 GHz and 5.8 GHz frequencies were contained in the passing bands.

Keywords: ABS; RF devices; 3D printing; Frequency Selective Surface; PLA.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Tipos de arranjos de uma FSS e seus respectivos comportamentos.	17
Figura 02 – Formas típicas de elementos.	18
Figura 03 – Rede de duas portas.....	19
Figura 04 – Matriz de espalhamento S.	19
Figura 05 – Leis de Reflexão e Refração.	21
Figura 06 – Processo de fabricação de peça por impressão 3D.....	25
Figura 07 – Modelos CAD: (a) absorvedor piramidal; (b) FSS absorvedora.....	28
Figura 08 - Substrato de material 3D.	30
Figura 09 - Geometria e dimensões utilizadas na estrutura <i>single-band</i> para 2,4 GHz.	31
Figura 10 - Geometria e dimensões utilizadas na estrutura <i>single-band</i> para 5,8 GHz.	31
Figura 11 – Geometria da FSS <i>dual-band</i>	32
Figura 12 - ABS 100 com permissividade $\epsilon' = 2,2408$	34
Figura 13 - PLA condutivo com permissividade $\epsilon' = 3,6442$	34
Figura 14 - ABS com permissividade $\epsilon' = 2,65$	35
Figura 15 - Geometria da FSS <i>dual-band</i>	36
Figura 16 - Comportamento da FSS <i>dual-band</i> com ABS 100 para as frequências de 2,4 e 5,8 GHz.....	37
Figura 17 - Comportamento da FSS <i>dual-band</i> com PLA condutivo para as frequências de 2,4 e 5,8 GHz.....	37
Figura 18 - Comportamento da FSS <i>dual-band</i> com ABS para as frequências de 2,4 e 5,8 GHz.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Permissividade dos materiais de impressão 3D.....	29
Tabela 2	–	Dimensões da FSS <i>dual-band</i>	32
Tabela 3	–	Constantes dielétricas dos materiais.....	33
Tabela 4	–	Análise da resposta em frequência das FSSs com substrato de ABS 100, PLA condutivo e ABS.....	39

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	OBJETIVOS.....	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
2.	SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA.....	16
2.1	FORMAS DOS ELEMENTOS.....	17
2.2	PARÂMETROS FÍSICOS DAS SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA 18	
2.2.1	Matriz de Espalhamento S.....	18
2.2.2	Coeficiente de reflexão e transmissão	20
2.2.3	Ângulo de incidência.....	21
2.2.4	Permissividade elétrica.....	22
3.	MANUFATURA ADITIVA OU IMPRESSÃO 3D	24
3.1	MATERIAIS DE IMPRESSÃO 3D.....	25
3.1.1	ACRILONITRILA BUTADIENO ESTIRENO – ABS.....	25
3.1.2	POLI ÁCIDO LÁTICO – PLA	26
3.1.3	APLICAÇÕES DE IMPRESSÃO 3D.....	27
4.	METODOLOGIA.....	29
4.1	MATERIAIS	29
4.2	SIMULAÇÃO	29
4.2.1	Materiais de Impressão 3D.....	30
4.2.2	FSS DUAL-BAND.....	30
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	33
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
7.	REFERÊNCIAS	41

1. INTRODUÇÃO

Historicamente, o conhecimento sobre as Superfícies Seletivas em Frequência (*Frequency Selective Surfaces* - FSS) esteve relacionado com os estudos sobre difração óptica do físico americano David Rittenhouse. Diante dessa investigação, foi possível verificar a influência das dimensões físicas na resposta em frequência de estruturas que possuem elementos condutores ou de abertura distanciados periodicamente (CAMPOS, 2009).

De acordo com Munk (2000), o uso das FSS se intensificou na década de 1960, suas aplicações vêm crescendo devido ao seu amplo funcionamento no espectro eletromagnético. As FSS são utilizadas quando é necessário reter ou atenuar uma frequência específica, um exemplo de aplicação é a sua utilização na porta do micro-ondas, que funciona como um filtro passa-faixa e atenua a frequência de luz visível e retém as frequências de micro-ondas.

A manufatura aditiva – MA (*Additive Manufacturing* – AM) é um processo feito pela adição de material por camadas por meio de um modelo tridimensional, a impressão 3D faz uso desse processo e vem tendo destaque na produção de dispositivos pela redução de etapas na produção, as variadas máquinas no mercado, a viabilidade econômica e a possibilidade de desenvolver geometrias complexas (RODRIGUES *et.al*, 2017). O uso de materiais poliméricos como o Acrilonitrila Butadieno Estireno – ABS e o Poli Ácido Lático – PLA são comumente utilizados como matéria prima devido às suas propriedades e por seu fácil acesso (SANTOS *et.al*, 2018).

Segundo Campos (2009), o material utilizado na estrutura, assim como sua geometria e dimensões são importantes parâmetros, pois influenciam diretamente as características de transmissão e reflexão. Com as aplicações de impressões 3D em diversas áreas da engenharia e com a análise eletromagnética dos materiais, torna-se uma alternativa utilizá-los como substratos em estruturas, tendo menores custos e sendo desenvolvidos por métodos não convencionais, assim, facilitando a construção de dispositivos de Rádio Frequência – RF.

Portanto, o uso de materiais não convencionais como substrato, como os materiais de impressão 3D, traz uma opção para aplicações em dispositivos de Rádio Frequência – RF. À vista disso, nesse trabalho será realizado uma abordagem sobre o uso de materiais de impressão 3D em Superfícies Seletivas em Frequência *Dual-band* do tipo rejeita-faixa, atendendo aos padrões da *Industrial, Scientific and Medical* – ISM, regido pelo *Institute of Electrical and Electronic Engineers* – IEEE 802.11, para as frequências de operação de 2,4 GHz e 5,8 GHz.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 *Objetivo Geral*

Investigar o uso de materiais de impressão 3D em Superfícies Seletivas em Frequência *dual-band* do tipo rejeita-faixa nas frequências de operação de 2,4 GHz e 5,8 GHz, no padrões da ISM, de acordo com o IEEE 802.11.

1.1.2 *Objetivos Específicos*

- Realizar um levantamento bibliográfico acerca das superfícies seletivas em frequência;
- Investigar a geometria e as dimensões adequadas para o uso de materiais de impressão 3D como substrato;
- Simular a superfície seletiva em frequência no *software* ANSYS HFSS;
- Verificar a influência dos materiais ABS e PLA na resposta em frequência das FSSs.

2. SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA

As pesquisas acerca de dispositivos planares vêm se tornando mais frequente nos últimos anos, devido a necessidade de implantar tecnologias em dispositivos com dimensões menores. Nesse âmbito, os estudos com as Superfícies Seletivas em Frequência (*Frequency Selective Surfaces* - FSS) têm sido crescente, em virtude de suas dimensões e peso (CAMPOS, 2009).

Os princípios físicos sobre as Superfícies Seletivas em Frequência estiveram atrelados aos estudos de grades de difração em óptica, realizado pelo físico David Rittenhouse. Tais estudos estavam relacionados a decomposição de feixes de luz não monocromáticos em suas ordens espectrais, Rittenhouse usou um aparato com fios igualmente espaçados e posicionou o arranjo em direção a luz e notou a filtragem da luz branca em meio a comprimentos de ondas distintas, que eram espaçadas da luz branca central e que este espaçamento era derivado do espaçamento entre os fios do aparato (CAMPOS, 2009).

O fenômeno físico descrito por Rittenhouse, demonstrou a dependência da resposta em frequência de um arranjo sob suas características físicas, o que é crucial para o entendimento de estruturas com elementos condutores ou de abertura espaçadas periodicamente, assim como a configuração e o espaçamento dos elementos podem influenciar no modo que os campos se espalham (CAMPOS, 2009).

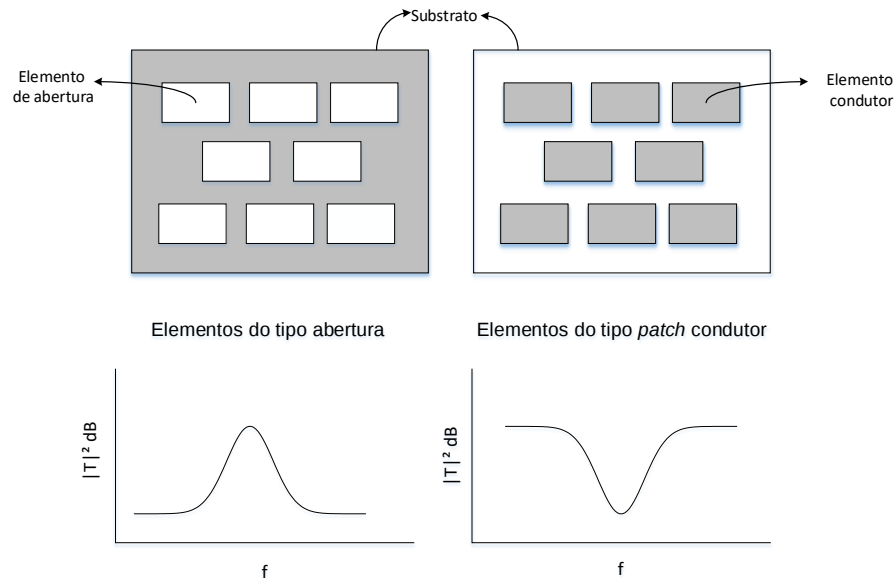
De acordo com Campos (2009): “Uma superfície seletiva em frequência (*Frequency Selective Surface* – FSS) é um arranjo periódico de aberturas ou de elementos condutores”, onde o arranjo desses elementos direciona a resposta que a estrutura irá ter, visto na Figura 01. O seu funcionamento é semelhante ao dos filtros e pode ser projetado para responder de forma similar aos filtros rejeita-faixa, passa-faixa, passa-alta e passa-baixa (BRAZ, 2014).

Os elementos do tipo abertura operam como um filtro passa-faixa, à medida que os elementos entram em ressonância, a estrutura fica “transparente” na frequência de operação e com isso a onda é totalmente transmitida. Já os elementos do tipo *patch* condutor operam como um filtro rejeita-faixa, os *patches* ressoam e realizam a irradiação da potência em direção da reflexão, até estarem na frequência de operação da estrutura que funciona como um condutor perfeito, refletindo toda a onda (CAMPOS, 2009).

Filtros são circuitos que operam de modo a selecionar ou rejeitar faixa(s) de frequência(s) diante da frequência de sinal nele aplicado e são classificados de acordo com a

tecnologia e componentes empregados na sua construção (MUSSOI, 2004). Em síntese, pode-se dizer que uma FSS se comporta como um filtro passivo de onda eletromagnética.

Figura 01 – Tipos de arranjos de uma FSS e seus respectivos comportamentos.



Fonte: Adaptado de Campos, 2009

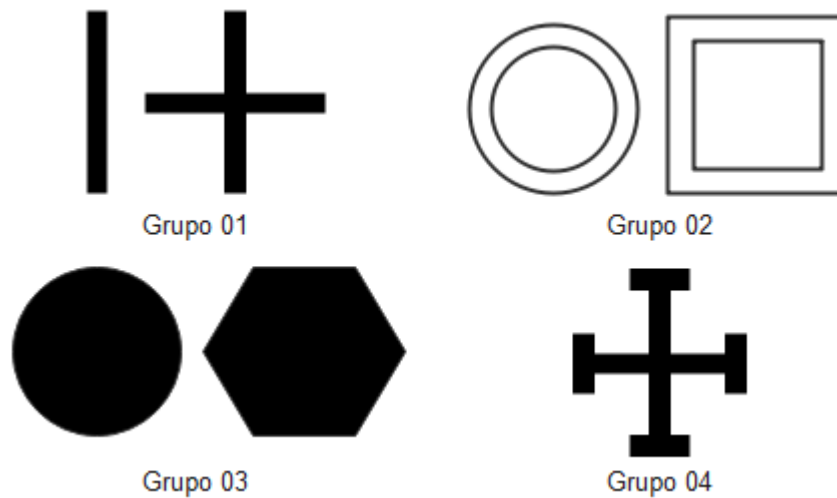
As dimensões físicas das FSS são importantes parâmetros de projetos, como os materiais utilizados no seu substrato e as formas de elementos da estrutura, pois tais propriedades possuem influência nos comportamentos de transmissão e de reflexão da estrutura (CAMPOS, 2009).

2.1 FORMAS DOS ELEMENTOS

A escolha da forma do elemento adequado para o dimensionamento da FSS é fundamental, pois possui grande influência em seu comportamento (MUNK, 2000). Na literatura há diversos tipos e combinações de elementos, de acordo com Munk (2000), esses elementos são divididos em quatro grupos e na Figura 02 são mostrados alguns exemplos desses elementos pertencentes a cada grupo.

- Grupo 1: Que possuem o centro conectado ou N-polos, como dipolos retos;
- Grupo 2: Elementos do tipo *loop*, como espiras;
- Grupo 3: Elementos de interior sólidos;
- Grupo 4: Combinações de elementos.

Figura 02 – Formas típicas de elementos.



Fonte: Adaptado de Munk, 2000.

2.2 PARÂMETROS FÍSICOS DAS SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA

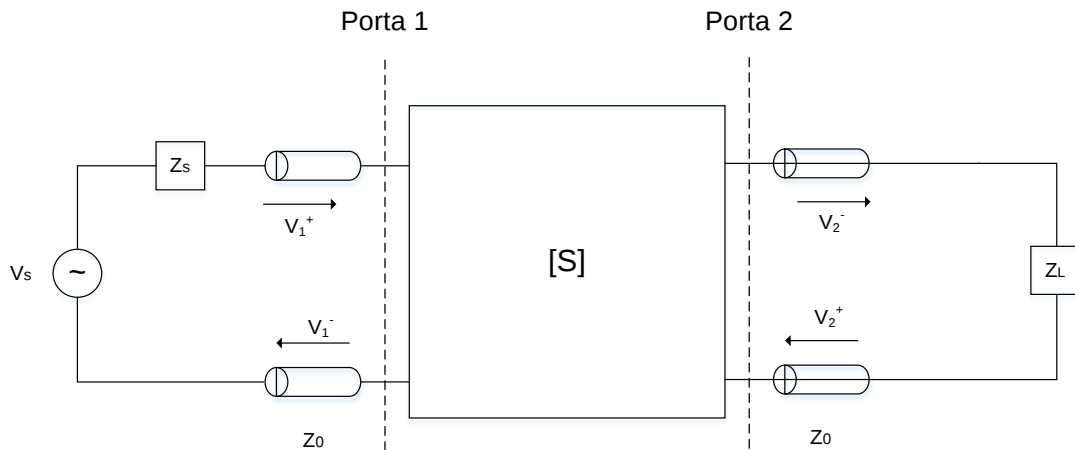
2.2.1 Matriz de Espalhamento S

Redes de duas multiportas e multiportas podem ser caracterizadas por uma série de parâmetros equivalente do circuito, como as matrizes de transferência, admitância, impedância e dispersão (ORFANIDIS, 2016).

Em baixas frequências, a rede pode ser caracterizada por um conjunto de parâmetros que relaciona as variáveis de tensão e corrente, para a medições desses parâmetros são utilizados curtos e circuitos abertos. Já em altas frequências, há uma dificuldade associada na medição das correntes e tensões, devido a falta de equipamento adequado, assim como a inviabilidade de curtos e circuitos abertos em uma ampla faixa de frequências, portanto há a necessidade de um novo conjunto de parâmetros para caracterizar o comportamento físico de dispositivos de largas faixas de frequências (CÉSAR, 2014).

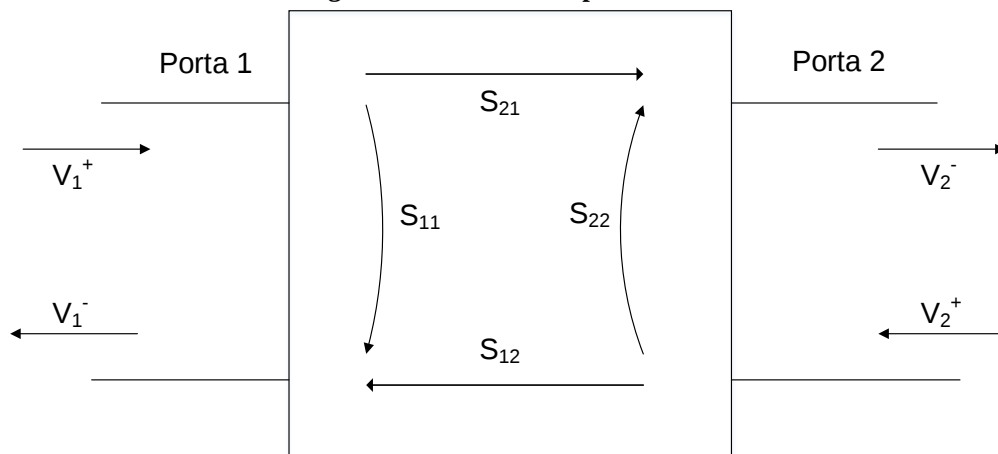
Uma solução útil para sistemas em altas frequências são os parâmetros de espalhamento S (ou parâmetros S), a matriz de espalhamento relaciona as ondas de saída com as ondas de entrada (ORFANIDIS, 2016). Na Figura 03 é mostrado o esquema da rede de duas portas para os parâmetros S e o entendimento dos parâmetros S pode se dar pela análise das ondas que entram e saem nas portas 1 e 2.

A tensão V_1^+ que entra na porta 1, parte é transmitida para a porta 2 e parte é refletida na porta 1, da mesma forma que na porta 2 a tensão V_2^+ tem uma parcela transmitida para a porta 1 e parte refletida na própria porta. As parcelas que são transmitidas e refletidas em cada porta contribuem para ondas que entram e saem das portas (WENTWORTH, 2006).

Figura 03 – Rede de duas portas

Fonte: Adaptado de Wentworth, 2006.

Em síntese, as parcelas de tensões são constituídas por contribuições das duas portas, sendo que a parcela de onda que entra na porta 1, V_1^+ , parte é refletida e juntamente com a parcela da onda que entra na porta 2, V_2^+ , constituem a parcela V_1^- que sai da porta 1. A parte da onda que é transmitida da porta 1 para a porta 2 em conjunto com a parcela da onda que foi refletida na porta 2 formam a fração da onda que sai pela porta 2 (WENTWORTH, 2006). Na Figura 04 é visto de forma mais simplificada esse esquema.

Figura 04 – Matriz de espalhamento S.

Fonte: Adaptado de Wentworth, 2006.

Sendo os elementos S_{11} , S_{12} , S_{21} e S_{22} os parâmetros de espalhamento, onde S_{11} e S_{22} caracterizam os coeficientes de reflexão e o S_{12} e S_{21} caracterizam os coeficientes de transmissão (ORFANIDIS, 2016). Matematicamente, as frações de onda podem ser descritas como sendo:

$$V_1^- = S_{11} \cdot V_1^+ + S_{12} \cdot V_2^+ \quad (01)$$

$$V_2^- = S_{21} \cdot V_1^+ + S_{22} \cdot V_2^+ \quad (02)$$

sendo que, V_1^- é composta pela parte da onda refletida na porta 1 e pela parte transmitida da porta 2 e V_2^- composta pela parte transmitida da porta 1 e pela parte refletida da porta 2, em forma matricial as Equações 01 e 02 são descritas como:

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \end{bmatrix} \quad (03)$$

$$[V]^- = [S] \cdot [V]^+ \quad (04)$$

onde $[S]$ é a matriz de espalhamento (WENTWORTH, 2006).

2.2.2 Coeficiente de reflexão e transmissão

As medidas reais dos parâmetros S são feitas de modo a conectar a carga $Z_L = Z_0$, então não haverá reflexão na carga e $V_2^+ = 0$, deste modo as Equações 01 e 02 tornam-se:

$$V_1^- = S_{11} \cdot V_1^+ \quad (05)$$

$$V_2^- = S_{21} \cdot V_1^+ \quad (06)$$

logo, tem-se o coeficiente de reflexão e de transmissão como mostrado nas Equações 07 e 08 respectivamente.

$$S_{11} = \left. \frac{V_1^-}{V_1^+} \right|_{Z_L = Z_0} \quad (07)$$

$$S_{21} = \left. \frac{V_2^-}{V_1^+} \right|_{Z_L = Z_0} \quad (08)$$

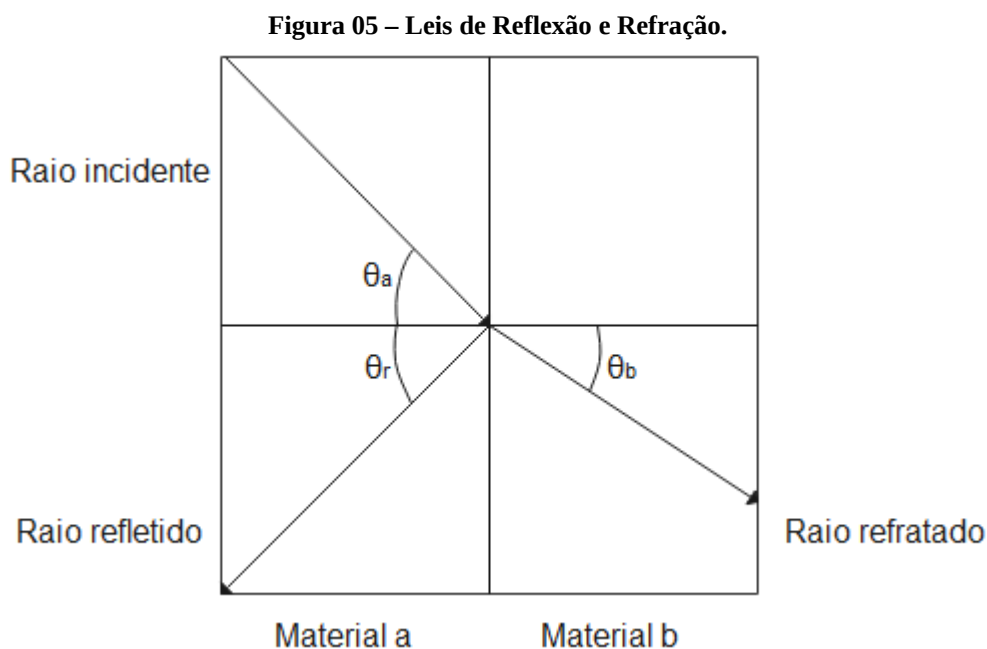
E para medir os parâmetros S_{12} e S_{22} , só precisa reverter os papéis do gerador e da carga. (ORFANIDIS, 2016).

Quando as ondas são transmitidas ou refletidas, geram perdas no caminho, essas perdas podem ser perdas de retorno, em casos de reflexão, ou perdas de inserção para casos de transmissão. As perdas por retorno correspondem o quanto do sinal foi refletido, causados pelo descasamento de impedância. Já as perdas de inserção são devidas as perdas de sinal quando é propagado por um meio e/ou caminho, já que há uma resistência associada em cada material, que faz com que o sinal de entrada seja maior que o sinal de saída. Em síntese, a perda por retorno está associada a diferença entre o sinal de entrada e o sinal refletido e a perda por inserção são a diferença entre o sinal de entrada e o sinal de saída, desde que todos os valores estejam em decibéis – dB (NOGUEIRA, 2020).

2.2.3 Ângulo de incidência

Apesar das ondas se espalharem ao ponto que se afastas de sua fonte, uma boa aproximação é que a onda se propaga de forma retilínea, essa aproximação é denominada ótica geométrica (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016). Uma onda que se propaga no espaço, ao atingir uma superfície com uma determinada angulação, essa angulação é definida como ângulo de incidência que é formado pelo raio incidente e a reta normal da superfície (FREEDMAN; YOUNG, 2009).

Considerando uma onda luminosa incidente em uma superfície que separa dois meios, de modo geral parte dessa onda é refletida e parte é transmitida (refratada) para o outro meio. Os estudos sobre as direções dos feixes de ondas incidentes, refletidos, transmitidos e refratados (ou transmitidos) demonstra que todos os raios desses feixes estão contidos em um mesmo plano, na Figura 05 é mostrada o esquema desses raios e seus respectivos ângulos, este plano é perpendicular ao plano da interface entre os dois materiais, e todos os ângulos são medidos a partir da reta normal (FREEDMAN; YOUNG, 2009).



Fonte: Adaptado de FREEDMAN, YOUNG (2009).

Quando uma onda ultrapassa de um material (ou superfície) a para b, os ângulos das ondas refletidas e refratadas são relacionados por meio dos índices de refração, esta é conhecida como lei da refração ou lei de Snell (FREEDMAN; YOUNG, 2009), mostrada nas Equações 09 e 10.

$$\frac{\sin \theta_a}{\sin \theta_b} = \frac{n_b}{n_a} \quad (09)$$

$$\text{sen } \theta_a \cdot n_a = \text{sen } \theta_b \cdot n_b \quad (10)$$

A lei da reflexão é constituída pelas afirmações que os raios incidentes, refletidos e refratados estão contidos no mesmo plano, assim como que os ângulos de reflexão θ_r são iguais aos ângulos de incidência θ_a , para quaisquer comprimentos de onda, exibido na Equação 10 (FREEDMAN; YOUNG, 2009).

$$\theta_r = \theta_a \quad (11)$$

É importante que a FSS tenha uma baixa sensibilidade a variações dos ângulos de incidência, já que este é um fator que pode interferir no comportamento da estrutura. Essa dependência pode ser analisada devido aos cálculos de circuito equivalente, onde os valores indutivos e capacitivos calculados dependem do ângulo de incidência, portanto, a frequência de operação da FSS também possui dependência ao ângulo de incidência.

2.2.4 Permissividade elétrica

A permissividade elétrica é uma característica específica de qualquer material ou meio que indica como este será quando interagido com um campo elétrico, ou como irá se comportar na presença de um campo elétrico. A distribuição eletrônica das moléculas se polariza na presença de um campo elétrico, gerando conseqüentemente, uma permissividade elétrica (RECH; PEROTONNI, 2015). Quando maior for a permissividade elétrica de um meio ou material, mais fácil este é de se orientar e formar dipolos induzidos devido a um campo elétrico.

Nos materiais condutores, os elétrons dos átomos transitam livremente no material, em contrapartida, em materiais dielétricos seus elétrons são fortemente ligados a seus átomos ou moléculas específicas, conseqüentemente limitando o movimento dentro deles (GRIFFITHS, 2011).

Quando um campo elétrico externo é introduzido em um material, os elétrons desse material se deslocam para uma região maior e por um maior período tempo, do que o que usualmente seriam movimentados, criando um efeito de dipolo (SILVA, 2014). Na presença de um campo elétrico externo, o núcleo dos átomos é empurrado no sentido do campo elétrico e os elétrons para o sentido oposto, as cargas positivas e negativas se atraem, mantendo a integridade dos átomos, sendo assim, são geradas forças opostas que acarretam em um equilíbrio e deixa o átomo polarizado. Dessa forma, é induzido um dipolo $\vec{p}$ na mesma direção do campo $\vec{E}$ (GRIFFITHS, 2011). O processo responsável pela indução de cargas elétricas por meio de um campo elétrico externo é conhecido como polarização. (SILVA, 2014).

As ações físicas que podem interferir os campos elétricos de uma onda EM é denominada de permissividade elétrica complexa, onde a parte real é tomada como sendo ε' e a parte imaginária ε'' , mostrada na Equação 12. A razão entre a parte imaginária e a parte real da permissividade elétrica é definida como tangente de perdas, essa variável indica o quantitativo de perdas de um material, para materiais dielétricos sua magnitude é expressa como mostrado na Equação 12 (HAYT, 2013).

$$\varepsilon = \varepsilon' \pm j\varepsilon'' \quad (11)$$

$$tg \theta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (12)$$

Para os materiais dielétricos, a tangente de perdas está diretamente associada a parcela imaginária da permissividade, pois o material só apresentaria perdas se houvesse uma parcela imaginária, sendo assim, para uma ε'' nula, a $tg \theta$ também seria nula, o que indica que as perdas de um material está atrelada a essa variável, quanto maior for a permissividade elétrica imaginária, mais perdas associadas ele terá. Sendo assim, a tangente de perdas é um bom parâmetro para se avaliar se o quão condutor ou dielétrico é um material (GRIFFITHS, 2014). Para bons dielétricos:

$$tg \theta \ll 1 \quad (13)$$

E para bons condutores:

$$tg \theta \gg 1 \quad (14)$$

O modo que um material se comporta de acordo com a direção em que o campo elétrico é introduzido a ele, definem os materiais como isotrópicos ou anisotrópicos. Um material isotrópico, suas características não dependem da direção, nesse sentido, um material dielétrico isotrópico, a sua permissividade elétrica não depende da direção do campo elétrico, já materiais anisotrópicos são dependentes da direção, ou seja, para os dielétricos, a permissividade irá ser dependente da direção do campo elétrico (HAYT, 2013).

A permissividade elétrica, assim como a anisotropia e a espessura do material, gera influência na resposta em frequência da FSS, já que essas propriedades podem alterar o comprimento de onda efetivo do sinal, fazendo com quê a frequência de operação da estrutura seja alterada (CAMPOS, 2002).

3. MANUFATURA ADITIVA OU IMPRESSÃO 3D

O processo de desenvolvimento de produtos, vem sendo modificado devido a concorrência comercial e a complexidade dos produtos, visando diminuir o período dedicado, aumentar a qualidade e a competitividade dos produtos, mediante isso a Manufatura Aditiva (*Additive Manufacturing* – AM) também conhecida como impressão tridimensional – 3D tornou-se uma viável possibilidade para o desenvolvimento e aprimoramento de produtos (VOLPATO; et.al, 2017).

Os processos típicos de fabricação são baseados em modelagem, remoção, conformação, união e divisão do material, no entanto no final da década de 1980 houve a introdução de um novo processo de fabricação que se baseava na adição de material (VOLPATO; et.al, 2017). Manufatura aditiva é a nomenclatura usada para o processo de manufatura digital por adição e que ficou comumente conhecido como Impressão 3D.

A impressão 3D traz a possibilidade para o mercado de criar peças e/ou objetos geometricamente complexos, de modo fácil e sem a necessidade do uso de ferramentas caras, mostrando ser uma atrativa técnica de produção (CASTLES et.al, 2016).

Segundo Volpato (2017, p.16): “A AM pode ser definida como um processo de fabricação por meio da adição sucessiva de material na forma de camadas, com informações obtidas diretamente de uma representação geométrica computacional 3D do componente”, ou seja, o procedimento feito por impressão 3D consiste na união de técnicas para construir um protótipo sólido tridimensional a partir de um modelo digital, onde um objeto real é feito através de um modelo 3D (HAMOD, 2014).

O processo de AM geralmente inicia-se com um modelo geométrico tridimensional, feito em um sistema CAD (*Computer Aided Design*), onde a peça a ser produzida é partida em camadas para se obter as curvas de nível do material e passar de um modelo 3D para um modelo 2D e com isso saber onde será adicionado o material. O processo de construção da peça é feito por meio da adição do material, camada por camada em forma de empilhamento, seguindo da base ao topo (VOLPATO; et.al, 2017). Em síntese, o processo funciona da seguinte maneira (VOLPATO; et.al, 2017) e a representação desse processo é mostrado na Figura 06:

- É feita a modelagem 3D, comumente em um sistema CAD;
- Obter o modelo 3D em um formato específico para a MA;
- Preparação do modo de construção do material (como será “fatiado” e como será a implementação do material por camadas);

- Fabricação da peça;
- Pós-processamento da peça.

Figura 06 – Processo de fabricação de peça por impressão 3D.

			
Modelo geométrico 3D (por exemplo, CAD)	Planejamento de processo (fatiamento)	Processamento por adição das camadas	Peça fabricada
Modelo eletrônico 3D		Modelo físico	

Fonte: VOLPATO; et.al (2017, p.17)

3.1 MATERIAIS DE IMPRESSÃO 3D

O plástico tornou-se um material indispensável, em função de sua diversidade de aplicações, seu uso se intensificou graças a suas propriedades e por vantagens como leveza, resistência a corrosão, facilidade de processamento e entre outros e apesar de possuir limitações, esses materiais são explorados por *designers* e engenheiros para diversos tipos de produtos (CRAWFORD, 1998).

Os plásticos são feitos por polímeros, a estrutura dos polímeros consiste em uma longa cadeia de moléculas semelhantes de metano ou etano e a união dessas moléculas constitui um processo chamado de polimerização. A polimerização ocorre pela reação química entre a junção dos monômeros para gerar as cadeias moleculares chamadas de polímeros (HAMOD, 2014). A elaboração de novas ligas de polímeros, consiste nas mesmas vantagens de ligas de metal que é trazer para um único material características de diversos outros, um exemplo de liga de polímeros é o ABS, que se tornou um material bem-sucedido comercialmente (CRAWFORD, 1998).

3.1.1 ACRILONITRILA BUTADIENO ESTIRENO – ABS

A Acrilonitrila Butadieno Estireno – ABS é um tipo de polímero termoplástico, da família “termopolímero” e é composto por três monômeros diferentes: A acrilotina, o butadieno

e o estireno (HAMOD, 2014). Como cada monômero possui propriedades distintas, assim, pode-se formar diversos tipos de ABS.

O ABS é um material bastante utilizado comercialmente, por ser viável economicamente e por suas características físicas como resistência, rigidez, além de possuir propriedades fortes e duráveis durante seu processamento em baixas temperaturas com boa resistência ao calor e a produtos químicos (HAMOD, 2014) e ainda pode ser de diversas cores possibilitando que sejam materiais opacos ou transparentes (eCycle, 2017). Este polímero é comumente aplicado como matéria prima para impressão 3D, em forma de filamento.

O ABS é um filamento bastante utilizado na MA, assim como o PLA, e seu uso pode ser direcionando para peças mais duráveis e que suportem altas temperaturas, já que este material possui uma vida útil bem estendida, em virtude de suas características o seu uso é aplicado em diversas áreas como, engenharia de precisão, indústrias elétricas ou automotivas (tech CD, 2020) e em dispositivos de RF. É recomendável que a superfície de impressão seja aquecida, já que o plástico ABS pode se contrair quando é resfriado e com isso gerar distorções nas peças.

3.1.2 POLI ÁCIDO LÁTICO – PLA

O Poli Ácido Lático – PLA pertence ao grupo dos termoplásticos, e é um material biodegradável feito de ácido lático, constituído a partir de matérias-primas renováveis. Este termoplástico possui alta resistência, o que possibilita dele ser processado em grande maioria dos processos plásticos convencionais, assim como ser usado como filamento para impressão 3D (HAMOD, 2014), (SANTOS *et.al*, 2018).

Assim como o ABS, o PLA também é bastante implementado nos processos de MA, por ser um material biodegradável pode ser tornar um substituto ao ABS quando se deseja ser menos agressivo ao meio ambiente, porém o seu custo é mais elevado, o que pode se tornar um material menos atrativo comercialmente (eCycle, 2017). Esse tipo de filamento dificilmente causa problemas durante a impressão e é menos propenso a ter problemas com distorção na peça, como pode ocorrer com o ABS e por ser um material biodegradável a sua decomposição acontece de forma mais rápida que os seus semelhantes (tech CD, 2020). Suas aplicações podem ser similares àquelas do ABS, desde que não precisem ser resistentes a altas temperaturas.

3.1.3 APLICAÇÕES DE IMPRESSÃO 3D

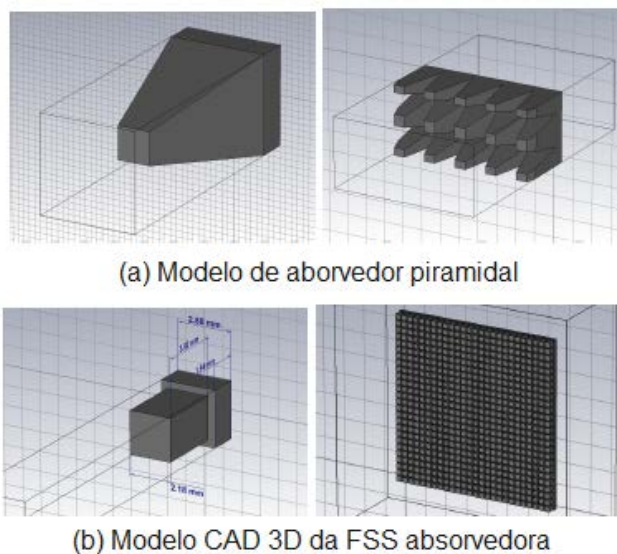
Inicialmente, os processos de impressão 3D se baseavam na obtenção visuais de protótipos, que não exigissem muito do material, precisão e desempenho, porém, com o avanço dessa tecnologia viu-se o potencial associado a ela e consequentemente se teve uma necessidade de uma melhoria na qualidade, nos materiais e no seu desempenho (VOLPATO; et.al, 2017). A versatilidade dos materiais de impressão 3D possibilita o seu uso em diversas áreas, de acordo com Volpato et.al (2017, p.28):

“Vários são os setores que podem se beneficiar do uso das tecnologias de AM, sendo já bastante difundidas nas indústrias aeroespacial, automobilística, de bioengenharia (medicina e odontologia), de produtos elétricos (utensílios domésticos), de produtos eletrônicos em geral e nos setores de joalheria, artes, engenharia civil, arquitetura etc.”

E ainda vem abrindo possibilidades para utilização dessa tecnologia em outras áreas, como o aproveitamento de suas características eletromagnéticas dos materiais para aplicações em dispositivos de RF, como em antenas (OLIVEIRA, 2020) e filtros (GOMES, 2019). A utilização da manufatura aditiva como substratos em antenas, filtros e FSS proporcionam sistemas que podem ser adequados a determinadas aplicações que antes seriam mais difíceis ser alcançados.

No trabalho de Kjelgard; Wisland; Lande (2018), é utilizado a impressão 3D pelo método de *Fused Deposition Modeling* – FDM para absorvedores de micro-ondas utilizando o filamento de Grafite/PLA (G/PLA), que mostrou ser um bom pretendente de baixo custo para aplicações de absorção e blindagem, já que esse composto é resistivo permite ser utilizado como absorvedor de ondas de rádio. Para tanto, foi apresentado duas estruturas baseadas em materiais de impressão 3D, uma estrutura piramidal truncada como absorvedor otimizado para as frequências de 2,6 GHz à 4 GHz e uma FSS absorvedora para as frequências entre 6 GHz à 8,5 GHz, que devido as suas altas permissividades e altas tangente de perdas demonstraram resultados satisfatórios entre os simulados e os medidos (KJELGARD, WISLAND, LANDE, 2018). Na Figura 07 é mostrado as formas 3D para os absorvedores e para a FSS absorvedora.

Figura 07 – Modelos CAD: (a) absorvedor piramidal; (b) FSS absorvedora.



Fonte: Adaptado de KJELGARD, WISLAND, LANDE (2018).

O uso da manufatura aditiva em circuitos de RF, assim como a utilização de materiais de impressão 3D como substrato para antenas e filtros, traz a facilidade para o desenvolvimento dessas estruturas, com custos menores. Em Oliveira, (2020), foi utilizado substratos de ABS para a construção de antenas de microfita com *patches* retangulares e circulares, sendo esses *patches* de adesivo de cobre e tinta condutiva, que retira a necessidade de processos de corrosão para a retirada do excesso de cobre, já que este é recortado antes de ser posto no substrato. As antenas se mostraram viáveis, de baixo custo e de fácil construção.

No trabalho de Bjorgaard et. al (2018), foram utilizados materiais de impressão 3D, tipos de PLA, na concepção de antenas. Primeiramente, foi realizado a caracterização elétrica de cada material por meio do método do cabo coaxial e de acordo com suas respectivas constantes dielétricas foram simuladas e fabricadas antenas de diferentes geometrias, de modo a se adequar com os valores das constantes dielétricas dos materiais, para a frequência ressonante de 2,45 GHz.

As técnicas de manufatura aditiva também podem ser aplicadas em circuitos RF, no trabalho de Martínez (2018), foi desenvolvido filtros de impedância escalonados para as faixas de frequência de 0,1 a 4 GHz, fazendo uso de PLA para seus substratos. O processo de fabricação se deu por método FDM, e validou o uso desse material como uma opção de baixo custo para circuitos planos de RF, que possui características elétricas viáveis para faixas de rádio frequência

4. METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho consistiu em investigar o uso de materiais de impressão 3D como substratos para estruturas FSS *dual-band* do tipo rejeita-faixa operando nas frequências de 2,4 GHz e 5,8 GHz, atendendo aos padrões da ISM, regido pelo IEEE 802.11. Os materiais utilizados para essa análise e suas características elétricas, são vistos no item 4.1. As simulações foram realizadas no *software* ANSOFT HFSS, para cada tipo de material e para cada FSS, descrita no item 4.2.

4.1 MATERIAIS

O Acrilonitrila Butadieno Estireno – ABS e o Poli Ácido Lático – PLA são polímeros comumente utilizados nos processos de MA, em forma de filamentos, devidos as suas propriedades mecânicas (SANTOS, 2018). Visto isso, para esse estudo utilizou-se dois tipos de ABS e um tipo de PLA, com diferentes características, para se averiguar o comportamento desses materiais a incidência de ondas EM e seu comportamento elétrico como material solo e como substrato de uma FSS. Os materiais utilizados estão mostrados na Tabela 1, assim como seus respectivos valores de permissividade elétrica medidos para a frequência de 2,4 GHz.

Tabela 1 – Permissividade dos materiais de impressão 3D.

MATERIAL	PERMISSIVIDADE ELÉTRICA (ϵ')
ABS 100	2,2408
PLA condutivo	3,6442
ABS	2,65

Fonte: Autoria própria, 2021.

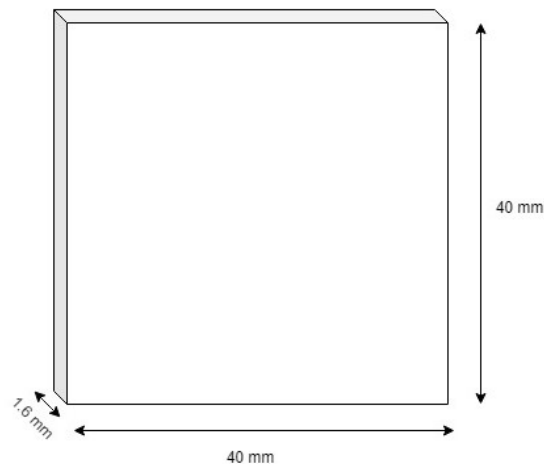
4.2 SIMULAÇÃO

Fez-se uso do *software* ANSOFT HFSS para realizar as simulações e obter os comportamentos de transmissão e reflexão dos materiais de impressão 3D e das FSS *dual-band* com os três tipos de material como substrato. Mediante os dados obtidos pelo HFSS, foi possível verificar as perdas de inserção em dB dos materiais sozinhos e dos materiais sendo utilizados como substrato das FSSs.

4.2.1 Materiais de Impressão 3D

Primeiramente, foram feitas as simulações para os materiais de impressão 3D, sendo eles o ABS, o ABS 100 e o PLA condutivo, para se ter os parâmetros de transmissão e reflexão usou-se um material, como visto na Figura 08 com suas respectivas dimensões

Figura 08 - Substrato de material 3D.



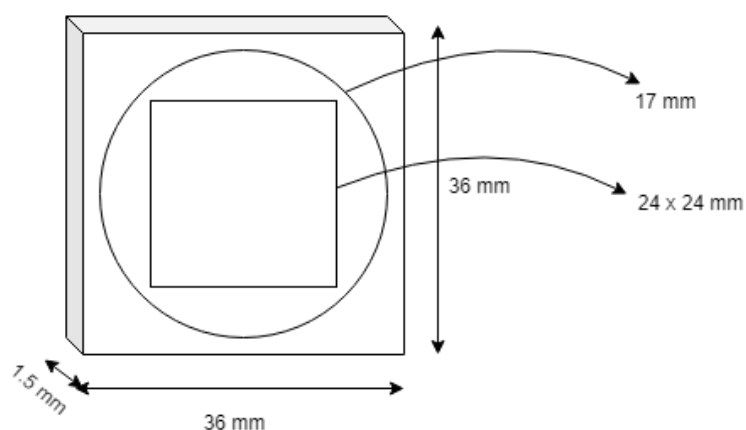
Fonte: Autoria própria, 2021

4.2.2 FSS DUAL-BAND

Para a escolha da geometria utilizada a geometria utilizada na FSS *dual-band* mostrada na Figura 11, fez-se testes com tipos de geometrias encontrados na literatura, para se obter um comportamento esperado, porém não houve sucesso com tais formas dos elementos. Dessa forma, optou-se por testar combinações de formas típicas, para se ter uma geometria funcional e adequada para o que é proposto.

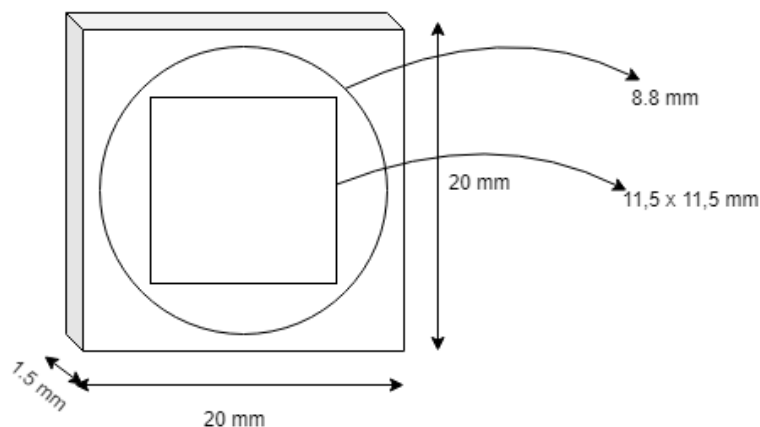
A combinação entre um *patch* circular e um *patch* retangular, demonstrou um comportamento interessante dentro do esperado, para tanto, para se obter uma geometria que operasse nas duas frequências desejadas, testou-se primeiramente a combinação com apenas um *patch*, para as frequências de 2,4 GHz e 5,8 GHz separadas, nas Figuras 09 e 10 são mostradas essas geometrias para as frequências de 2,4 GHz e 5,8 GHz respectivamente.

Figura 09 - Geometria e dimensões utilizadas na estrutura *single-band* para 2,4 GHz.



Fonte: Autoria própria, 2021.

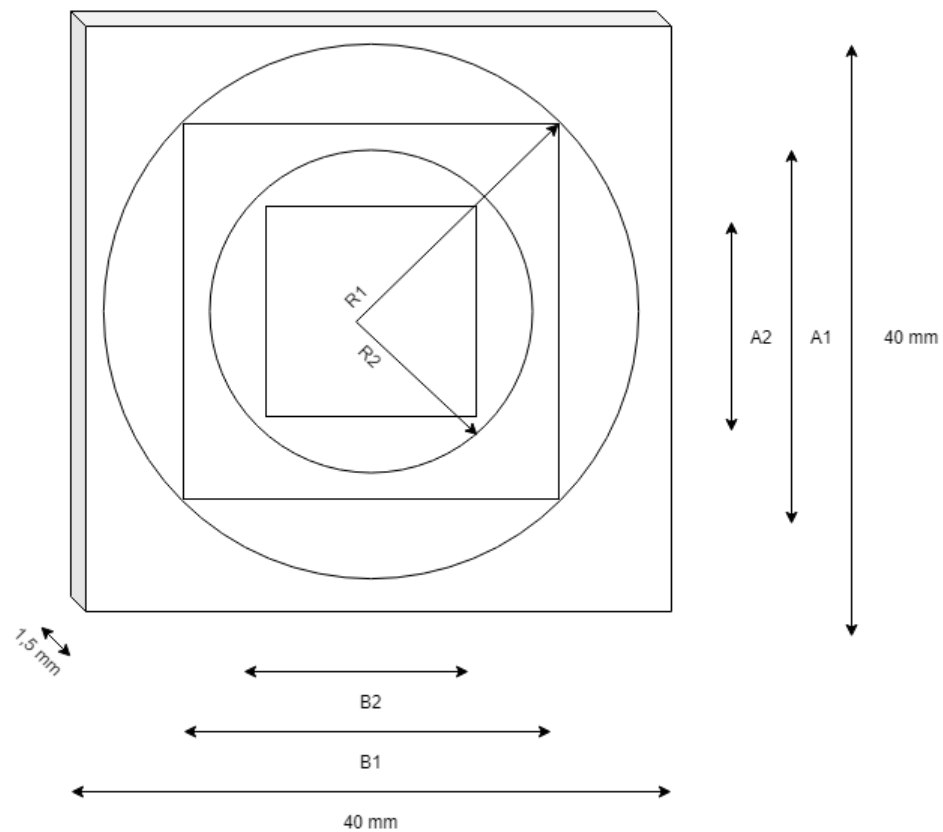
Figura 10 - Geometria e dimensões utilizadas na estrutura *single-band* para 5,8 GHz.



Fonte: Autoria própria, 2021.

Com as estruturas de FSS *single-band* notou-se que havia uma diferença notável nas dimensões das estruturas, sendo assim uniu-se os dois anéis em uma única estrutura para uma superfície única que operasse nas duas frequências, como mostrada na Figura 11. Para se obter uma geometria que operasse bem nas frequências desejadas, utilizou-se o método empírico onde testou-se diferentes dimensões e observou-se que para células com dimensões de 20x20 mm a frequência rejeitada só alcançava no mínimo 6 GHz, sabendo isso, testou-se células maiores e percebeu-se que ao aumentar a célula a frequência cortada iria diminuindo. No fim, a célula de 40x40 mm e com as dimensões descritas na Tabela 2, demonstrou resultados satisfatórios para o trabalho proposto.

Figura 11 – Geometria da FSS *dual-band*.



Fonte: Autoria própria, 2021.

Tabela 2 – Dimensões da FSS *dual-band*.

DIMENSÕES DA FSS DUAL-BAND	
1° <i>patch</i> (externo)	2° <i>patch</i> (interno)
$R_1 = 19 \text{ mm}$	$R_2 = 9,5 \text{ mm}$
$A_1 = B_1 = 25,5 \text{ mm}$	$A_2 = B_2 = 12,5 \text{ mm}$

Fonte: Autoria própria, 2021.

Após as simulações terem sido realizadas, fez-se uma análise comparativa entre os resultados obtidos somente com os materiais e das FSSs, para se investigar a viabilidade do uso de materiais de impressão 3D como substratos de estruturas de RF, como as FSSs.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Fez-se uso do *software* HFSS para realizar as simulações e obter os comportamentos de transmissão e reflexão dos materiais 3D e do uso desses materiais como substrato para uma FSS *Dual-band* do tipo rejeita-faixa que opere nas frequências de 2,4 GHz e 5,8 GHz, para se analisar a viabilidade de utilizar esses materiais atípicos como substrato da estrutura, assim como já utilizado em filtros e antenas.

Primeiramente, foi simulado apenas o substrato com materiais de impressão 3D, sendo dois tipos de ABS e um tipo de PLA, para se observar se apenas o material retornava alguma rejeição das frequências desejadas e assim ter uma análise do real impacto dos *pachts* condutores no material. As constantes dielétricas dos materiais já tinham sido testadas e tabeladas e seus valores de permissividade elétrica e tangente de perdas são demonstrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Constantes dielétricas dos materiais.

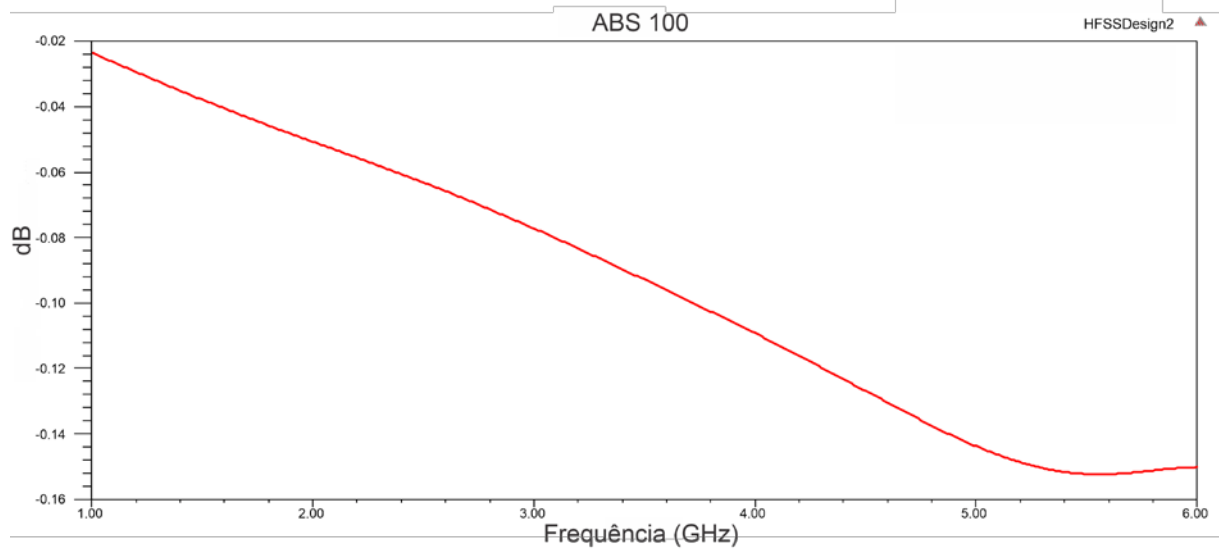
MATERIAL	PERMISSIVIDADE ELÉTRICA PARA 2,4 GHz			PERMISSIVIDADE ELÉTRICA PARA 5,8 GHz		
	Real (ϵ')	Imaginária (ϵ'')	Tangente de perdas ($\tan \theta$)	Real (ϵ')	Imaginária (ϵ'')	Tangente de perdas ($\tan \theta$)
ABS 100	2,2408	0,15035768	0,0671	2,0214	0,097	0,0480
PLA condutivo	3,6442	0,710619	0,195	3,0414	0,2231	0,0734
ABS	2,65	0,01272	0,048	-	-	-

Fonte: Autoria própria, 2021

De acordo com as permissividades coletadas, foi utilizada nas simulações as permissividades elétricas nos materiais referentes à frequência de 2,4 GHz, e como não há grandes diferenças entre as constantes dielétricas das frequências de 2,4 GHz e 5,8 GHz, foi possível utilizá-la nas simulações. Apenas para o material ABS só havia valores medidos para a frequência de 2,4 GHz.

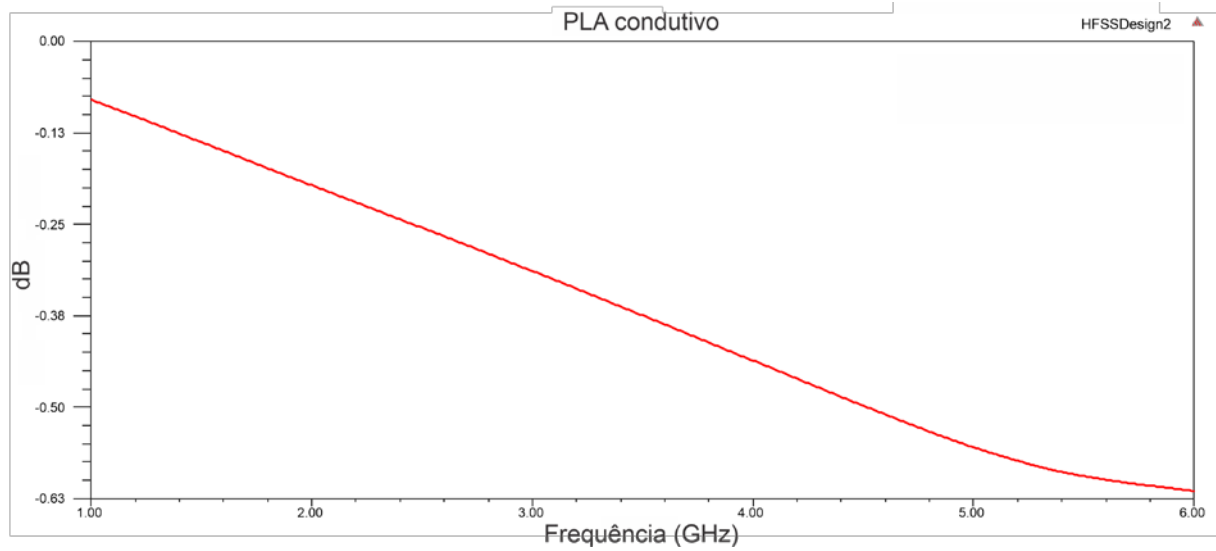
Para os três tipos de materiais, nota-se que não há um comportamento de rejeição nas faixas de frequências analisadas de 2,4 GHz e 5,8 GHz, as perdas de inserção em dB obtidas pelas simulações no HFSS são vistas nas Figuras 12, 13 e 14 para o ABS 100, PLA condutivo e ABS respectivamente. Visto isso, pelos comportamentos de perdas de inserção dos materiais, nota-se que apenas o material não é possível apresentar resposta em frequência característico de um filtro rejeita-faixa no intervalo de 1 a 6 GHz.

Figura 12 - ABS 100 com permissividade $\epsilon' = 2,2408$.



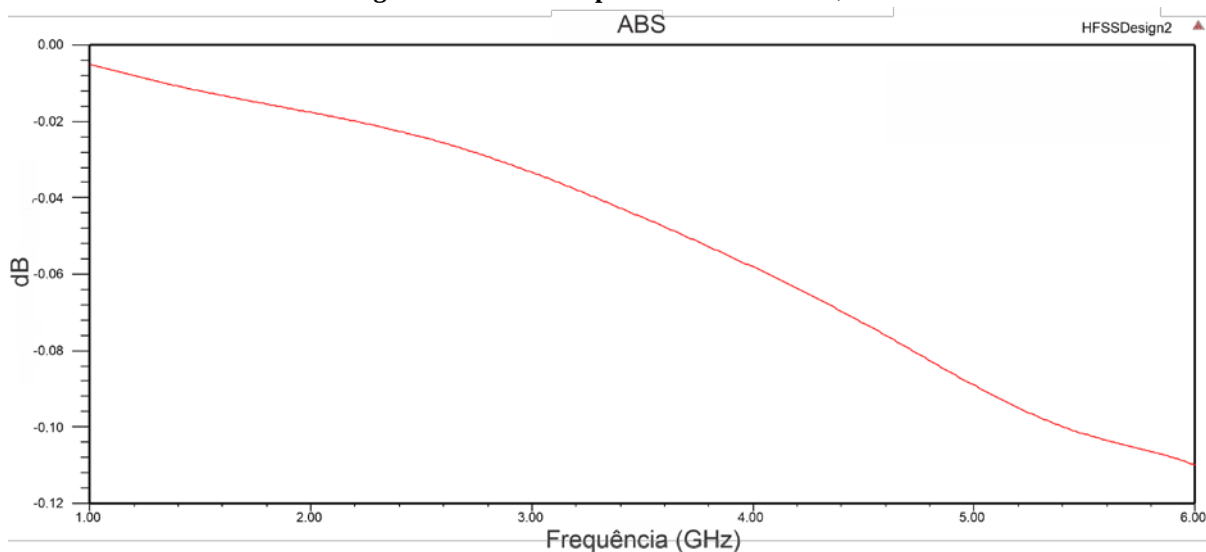
Fonte: Autoria própria, 2021.

Figura 13 - PLA condutivo com permissividade $\epsilon' = 3,6442$.



Fonte: Autoria própria, 2021.

Figura 14 - ABS com permissividade $\epsilon' = 2,65$.

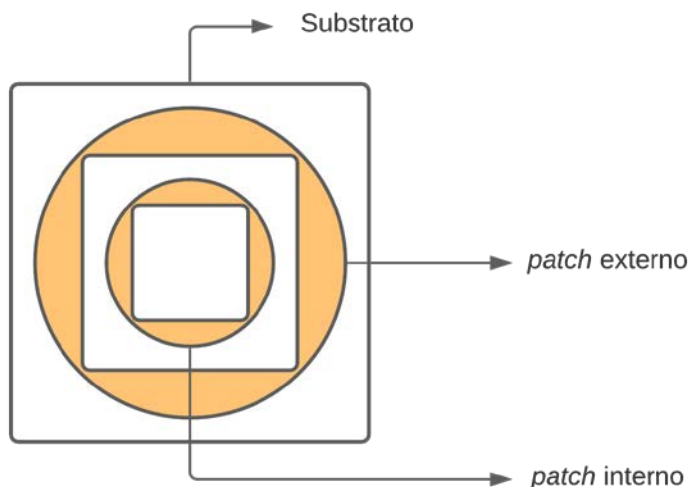


Fonte: Autoria própria, 2021.

Diante das simulações, percebe-se que apenas os materiais não são capazes de agir de forma a rejeitar os sinais, já que não apresentam comportamentos característicos de tais ações. Considerando o valor das tangentes de perdas, o ABS seria um melhor dielétrico entre os materiais estudados, já que de acordo com Hayt (2013) quanto menor for a tangente de perdas, melhor será o material como um dielétrico.

A forma do elemento e dimensões utilizados na estrutura foram obtidas através de testes, tanto entre combinações de formas de elementos, como das dimensões dos *patches*. Para se obter as dimensões utilizadas na estrutura, após ter conseguido a geometria que seria utilizada, testou-se diferentes combinações de dimensões e observou-se que em células de até 20x20 mm só havia rejeição de frequência em faixas acima de 6 GHz, o que estava fora do proposto, no entanto viu-se que ao aumentar o tamanho das células, e adequando as dimensões dos *patches*, a frequência cortada diminuía. Até que para uma célula de 40x40 mm com a forma de elemento alcançada por meio de combinações entre outras formas de elementos, teve-se resultados dentro do esperado, com a rejeição de frequências que abrangiam as frequências de operação proposto para a análise. Sendo assim, é possível constatar a resposta em frequência da estrutura em relação a sua geometria e dimensões físicas. Na Figura 15 é ilustrada a geometria utilizada, obtida através de combinações de *patches*.

Figura 15 - Geometria da FSS *dual-band*.

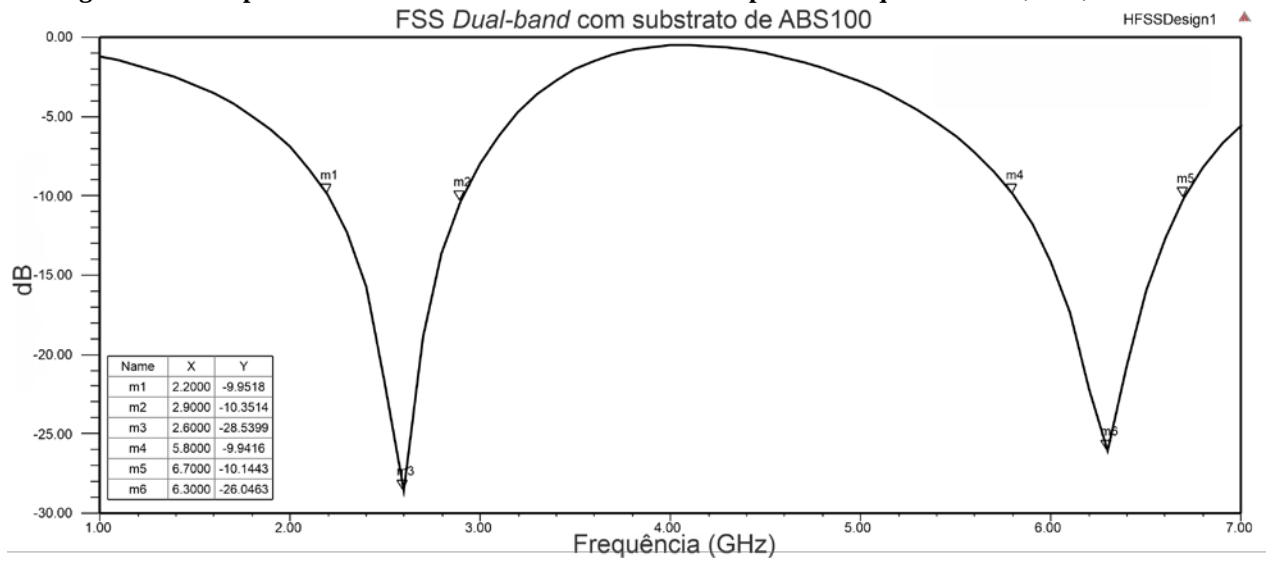


Fonte: Autoria própria, 2021.

Utilizando a mesma geometria e dimensões para simular uma FSS *dual-band* operante nas frequências de 2,4 GHz e 5,8 GHz, com os materiais ABS 100, PLA condutivo e ABS respectivamente, observou-se as perdas de inserção (dB) dessas estruturas. Anteriormente, as simulações das FSS foram feitas com diferentes dimensões, e pode-se constatar a resposta em frequência da estrutura em relação às suas dimensões físicas. Observou-se que com células maiores, a frequência cortada nas estruturas diminuía. A seguir será tratado sobre os comportamentos dessas superfícies.

Na Figura 16 é mostrado o comportamento de rejeição da FSS *dual-band* com substrato de ABS 100. A primeira largura de banda é de 0,7 GHz e ocorre em uma faixa de frequências de 2,2 GHz (-9,9518 dB) – 2,9 GHz (-10,3514 dB) com frequência central em 2,6 GHz (-28,5399 dB) e a para a segunda frequência possui uma largura de banda de 0,9 GHz em uma faixa de 5,8 GHz (-9,9416 dB) – 6,7 GHz (-10,1443 dB) com uma frequência central de 6,3 GHz (-26,0463 dB).

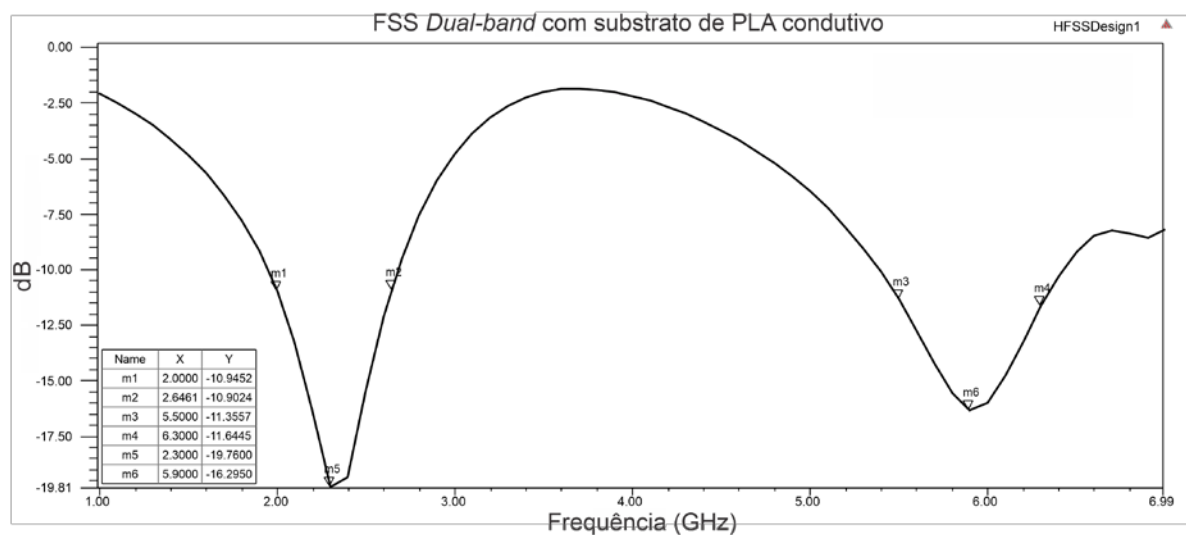
Figura 16 - Comportamento da FSS dual-band com ABS 100 para as frequências de 2,4 e 5,8 GHz.



Fonte: Autoria própria, 2021.

Na Figura 17 é mostrado o comportamento de rejeição da FSS *dual-band* com substrato de PLA condutivo, onde a primeira banda passante ocorre na frequência de 2 GHz (-10,9452 dB) até 2,65 GHz (-10,9024 dB) com uma largura de banda de 0,65 GHz e com frequência centra em 2,3 GHz (-19,76 dB) e a para a segunda banda, possui uma largura de banda de 0,8 GHz em uma faixa de frequências entre 5,5 GHz (-11,3557 dB) – 6,3 GHz (-11,6445 dB) e uma frequência central de 5,9 GHz (-16,2950 dB).

Figura 17 - Comportamento da FSS dual-band com PLA condutivo para as frequências de 2,4 e 5,8 GHz.

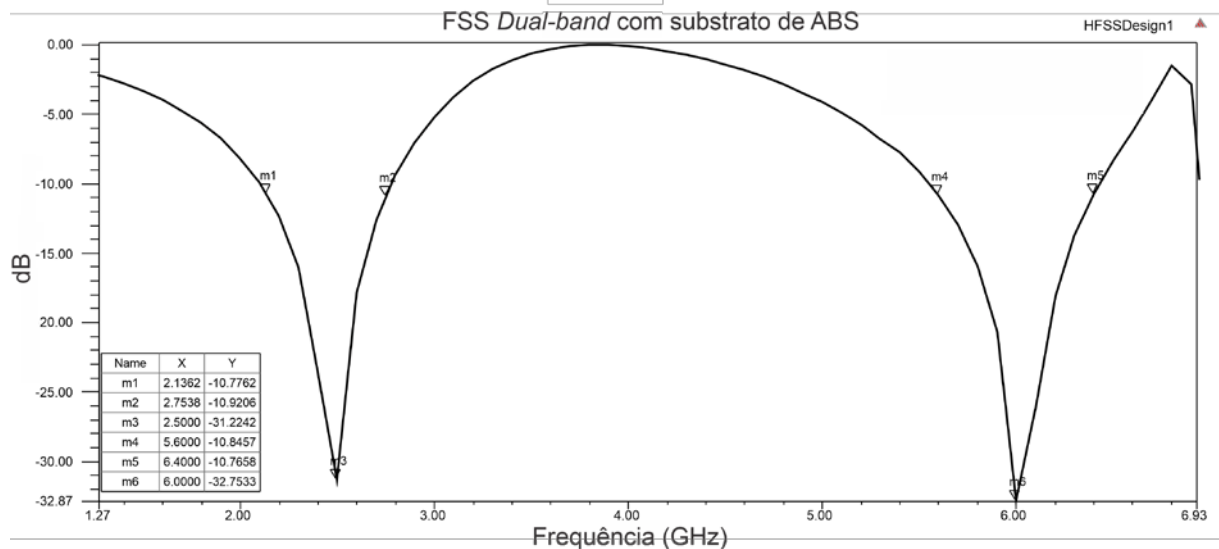


Fonte: Autoria própria, 2021.

Na Figura 18 é mostrado o comportamento de rejeição da FSS *dual-band* com substrato de ABS de permissividade $\epsilon' = 2,65$, onde a primeira faixa de operação ocorre aproximadamente na frequência de 2,14 GHz (-10,7762 dB) até 2,75 GHz (-10,9206 dB), com

uma largura de banda de 0,62 GHz e frequência central em 2,5 GHz (-31,2242 dB) e para a segunda faixa de frequência houve uma largura de banda de 0,8 GHz entre as frequências de 5,6 GHz (-10,8457 dB) – 6,4 GHz (-10,7658 dB) tendo como ponto central dessa faixa a frequência de 6 GHz (-32,7533 dB).

Figura 18 - Comportamento da FSS *dual-band* com ABS para as frequências de 2,4 e 5,8 GHz.



Fonte: Autoria própria, 2021.

Diante dos resultados obtidos pelas simulações, é possível perceber que os três materiais tiveram resultados satisfatórios e semelhantes entre si, o que já era esperado devido às suas permissividades elétricas terem valores próximos. Houve diferenças entre o começo das bandas passantes de um material para outro e entre as frequências centrais de operação, porém todos compreendem as frequências de 2,4 e 5,8 GHz em suas faixas de operação, como esperado. A largura de banda para a primeira frequência de operação ficou entre 620 MHz e 700 MHz entre os materiais e para segunda banda passante ficou entre 800 MHz e 900 MHz, sendo largas faixas de BW. Na Tabela 4 é posto todos os valores, para melhor análise das respostas em frequência das estruturas.

Tabela 4 – Análise da resposta em frequência das FSSs com substrato de ABS 100, PLA condutivo e ABS.

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DAS FSSs						
Material do substrato	Faixa de frequência de operação		Largura de banda	Faixa de frequência de operação		Largura de banda
	1ª faixa de operação	Frequência central		2ª faixa de operação	Frequência central	
ABS 100	2,2 GHz - 2,9 GHz	2,6 GHz	0,7 GHz	5,8 GHz - 6,7 GHz	6,3 GHz	0,9 GHz
PLA condutivo	2 GHz - 2,65 GHz	2,3 GHz	0,65 GHz	5,5 GHz - 6,3 GHz	5,9 GHz	0,8 GHz
ABS	2,14 GHz - 2,75 GHz	2,5 GHz	0,62 GHz	5,6 GHz - 6,4 GHz	6 GHz	0,8 GHz

Fonte: Autoria Própria, 2021

Fazendo um comparativo entre os resultados dos materiais solos e das FSSs, é notável a diferença entre os dados das estruturas, com isso, é possível averiguar a influência dos *patches* condutores no comportamento da estrutura, assim como a importância da forma do elemento utilizado para a sua operação adequada.

Apesar de apresentarem resultados semelhantes, houve diferenças entre os resultados dos materiais, isso pode ser dito como influência da permissividade elétrica no comportamento das estruturas. Já que, segundo Campos (2002), as características de permissividade elétrica, anisotropia e espessura do substrato podem alterar o comprimento de onda do sinal e consequentemente interferir na frequência de operação da FSS. Como para as simulações, há diferença é somente na permissividade elétrica dos substratos, pode se atribuir tais diferenças a esta constante dielétrica.

As três superfícies atendem ao proposto, visto que, nas faixas de frequências apresentadas as superfícies seletivas em frequência apresentam aspectos rejeita-faixa, apesar de nenhuma apresentar as frequências centrais como as frequências definidas. A FSS com substrato de ABS, se aproximou mais da primeira frequência desejada de 2,4 GHz, com uma frequência central de 2,5 GHz e a FSS com substrato de PLA condutivo ficou mais próxima da segunda faixa de frequência de 5,8 GHz, com uma frequência central de 5,9 GHz.

Portanto, os materiais de impressão 3D se mostraram como um possível elemento para fabricação de estruturas bidimensionais periódicas, sendo uma possibilidade de baixo custo e de fácil construção, assim como já foi provado sua utilização em outros elementos de RF como filtros e antenas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de materiais de impressão 3D vem se intensificando cada vez mais, assim como o uso de estruturas bidimensionais periódicas como as superfícies seletivas em frequência. Os processos de manufatura aditiva se tornam atrativos devido ao seu baixo custo e pela possibilidade de construir objetos e geometrias complexas, por meios descomplicados.

À vista disso, foi proposto uma abordagem teórica sobre o uso de alguns materiais utilizados na impressão 3D como substratos para estruturas FSSs *Dual-band* do tipo rejeita-faixa que operasse nas frequências de 2,4 GHz e 5,8 GHz. Para tanto, mediante o conhecimento das constantes dielétricas dos materiais em questão, sendo eles, o ABS, ABS 100 e PLA condutivo, foi possível analisar o comportamento das ondas no material em si e na FSS tendo o substrato com cada um desses materiais.

Nos materiais, observou-se que não havia comportamento característico de rejeição em nenhum deles. No entanto, para as estruturas *Dual-band* simuladas é possível verificar o comportamento rejeita-faixa que compreende as frequências operacionais de 2,4 GHz e 5,8 GHz para os três tipos de substratos, usando como referência a marca de -10 dB, com larguras de bandas que variam entre 0,62 GHz à 0,9 GHz.

Apesar das três estruturas apresentarem resultados semelhantes, houve diferenças nas faixas de frequência da banda passante, assim como em suas frequências centrais de operação, isso pode ser atribuído a diferença nas permissividades elétricas dos materiais, que possuem influência na resposta em frequência de uma FSS.

Em síntese, os materiais propostos se mostraram uma opção a ser considerada para substratos de dispositivos de RF, como a FSS, e as estruturas simuladas oferecem resultados satisfatórios para a análise proposta. Sendo assim, é apontado como possíveis trabalhos futuros:

- Fabricação e análise das FSSs nos materiais ABS, ABS 100 e PLA condutivo;
- Análise de outros materiais utilizados em impressão 3D, como substrato para dispositivos RF;
- Investigar a absorção dos materiais utilizados na manufatura aditiva, como possíveis absorvedores.

7. REFERÊNCIAS

1. BERDISOFT'S ELECTRONIC WISDOM BLOG. **How to convert decibels (dB) to linear units without calculator**. Disponível em: <<https://berdisoft.com/convert-db/>>. Acesso em: 06/10/2021.
2. BJORGAARD, Jason; et. al. DESIGN AND FABRICATION OF ANTENNAS USING 3D PRINTING. **Progress In Electromagnetics Research C**. Vol. 84, 119–134, 2018.
3. BRAZ, Érico Cadineli. Análise de Superfícies Seletivas em Frequência com Geometrias Multifractais. 2014. 106 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.
4. CAMPOS, Antônio Luiz Pereira de Siqueira. **Análise de Espelhamento em Superfícies Seletivas em Frequência com Multicamadas Dielétricas Anisotrópicas**. 2002. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba.
5. CAMPOS, Antônio Luiz Pereira de Siqueira. **Superfícies Seletivas em Frequência: Análise e Projeto**. Natal: IFRN Editora, 2009, 196 p.
6. CASTLES, F; et.al. MICROWAVE DIELECTRIC CHARACTERISATION OF 3D-PRINTED BATIO3/ABS POLYMER COMPOSITES. **Scientific Reports**. Dezembro, 2015. 8 p.
7. CÉSAR, Amílcar Careli. **Matriz Espalhamento (S): Parte 1**. Departamento de Engenharia Elétrica da EESC-USP. São Carlos, 2014. 23 slides.
8. CRAWFORD, R. J. **Plastics Engineering**. 3ª edição. Butterworth Heinemann, 1998.
9. ECYCLE. **Plástico ABS: você sabe onde ele está presente e do que é feito?**. Julho, 2017. Disponível em: < <https://www.ecycle.com.br/plastico-abs/>>. Acesso em: 20/10/2021.
10. ENTENDA A DIFERENÇA ENTRE OS FILAMENTOS PLA E ABS. **TechCD**, 2020. Disponível em: < <https://www.techcd.com.br/noticias/entenda-a-diferenca-entre-os-filamentos/>>. Acesso em: 20/10/2021
11. FREEDMAN, Roger A.; YOUNG, Hugh D. **Física IV: Ótica e Física Moderna**. 12 ed. São Paulo: Pearson, 2009. 420 p.

12. GOMES, Hadassa Juliana da Costa. **PROJETO E CARACTERIZAÇÃO DE FILTROS UTILIZANDO SUBSTRATO DE MATERIAIS PARA IMPRESSÃO 3D**. 2019. 43 f. Monografia - Curso de Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, 2019.
13. GRIFFITHS, David J. **Eletrodinâmica**. 3ª ed. São Paulo: Editora Pearson Education, 2011. 421 p. Tradução: Heloisa Coimbra de Souza.
14. HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física, volume 4: Óptica e Física Moderna**. 10ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. Tradução: Ronaldo Sérgio de Biasi.
15. HAMOD, Haruna. **Suitability of recycled HDPE for 3D printing filament**. Arcada University of Applied Science. Dezembro, 2014.
16. HAYT JÚNIOR, WilliamH; BUCK, John A. **Eletromagnetismo**. 8 ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. 595 p. Tradução: Marco Aurélio de Oliveira Schroeder.
17. KJELGARD, Kristian G; WISLAND, Dag T; LANDE, Tor S. 3D PRINTED WIDEBAND MICROWAVE ABSORBERS USING COMPOSITE GRAPHITE/PLA FILAMENT. **Proceedings of the 48th European Microwave Conference**. Setembro de 2018, p. 859-862.
18. MARTÍNEZ, Héctor García; et.al. Additive manufacturing techniques applied to the design of radio frequency planar circuits.
19. MUSSOI, Fernando Luiz Rosa. **Resposta em frequência: Filtros Passivos**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina – Gerência Educacional de Eletrônica, Edição 02. Florianópolis, 2004. 85p.
20. MUNK, Ben A. **Frequency Selective Surface: Theory and Design**. New York: John Wiley & Sons, INC., 2000.
21. NOGUEIRA, William. PERDA POR INSERÇÃO E PERDA POR RETORNO. **WHC Engenharia**, abril de 2020. Disponível em:<
<https://www.whcengenharia.com.br/post/perda-por-inser%C3%A7%C3%A3o-e-perda-por-retorno>>. Acesso em: 25/10/2021.
22. ORFANIDIS, Sophocles J. **Eletromagnetic Waves and Antennas**. Disponível em:<
<https://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa/>>. Acesso em: 10/10/2021.

23. OLIVEIRA, Aleandro dos. **DESENVOLVIMENTO DE ANTENAS DE MICROFITA UTILIZANDO TÉCNICAS DE IMPRESSÃO 3D**. 2020. 60 f. Monografia – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal Rural do Semi – Árido (UFERSA).
24. RECH, G; PEROTONNI, C.A. INSTRUMENTAÇÃO E ANÁLISE DA PERMISSIVIDADE ELÉTRICA DA ALUMINA. **XXI Encontro de Jovens Pesquisadores**. Universidade Caxias do Sul, Bom Princípio – RS, 2015.
25. RODRIGUES, Vinicius Picanço; *et.al*. Manufatura aditiva: estado da arte e framework de aplicações. **GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, Bauru, Ano 12, nº 3, jul-set/2017, p. 1-34.
26. SANTOS, Luana Machado dos; *et al*. TIPOS DE POLÍMEROS UTILIZADOS COMO MATERIA PRIMA NO MÉTODO DE MANUFATURA ADITIVA POR FDM: UMA ABORDAGEM CONCEITUAL. **XXXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUCAO**, Maceió – AL, outubro/2018, p. 1-12.
27. SILVA, Bruno Fontana da. ELETROSTÁTICA: Capacitância e dielétricos. **Instituto Federal de Santa Catarina – Campus São José**. 2014.
28. VOLPATO, Neri; *et. al*. **Manufatura Aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D**. Primeira Edição. São Paulo: Blucher, 2017. 400 p.
29. WENTWORTH, Stuart M. **Fundamentos de Eletromagnetismo**: com Aplicações em Engenharia. Rio de Janeiro: LTC, 2006. Traduções: Abelardo Podcameni e Gláucio Lima Siqueira.