



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JOSÉ FILIPE DE LIMA

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES ELETROMAGNÉTICAS DE
MATERIAIS VÍTREOS PARA DESENVOLVIMENTO DE SUPERFÍCIE
SELETIVA EM FREQUÊNCIA COM SUBSTRATO DE VIDRO PARA
APLICAÇÃO EM COMUNICAÇÃO *INDOOR***

MOSSORÓ

2021

JOSÉ FILIPE DE LIMA

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES ELETROMAGNÉTICAS DE
MATERIAIS VÍTREOS PARA DESENVOLVIMENTO DE SUPERFÍCIE
SELETIVA EM FREQUÊNCIA COM SUBSTRATO DE VIDRO PARA
APLICAÇÃO EM COMUNICAÇÃO *INDOOR***

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado.

Orientador: Humberto Dionísio de Andrade, Prof. Dr.

Co-orientador: Antônio Sérgio Bezerra Sombra, Prof. Dr.

MOSSORÓ

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.

L734e Lima, José Filipe de.
Estudo das propriedades eletromagnéticas de materiais vítreos para desenvolvimento de superfície seletiva em frequência com substrato de vidro para aplicação em comunicações indoor / José Filipe de Lima. - 2021.
139 f. : il.

Orientador: Humberto Dionísio de Andrade.
Coorientador: Antônio Sérgio Bezerra Sombra.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, 2021.

1. Comunicação indoor. 2. Substrato de vidro.
3. Superfícies seletivas em frequência. 4.
Tratamento térmico em vidro. I. Andrade, Humberto Dionísio de, orient. II. Bezerra Sombra, Antônio Sérgio, co-orient. III. Título

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade com AACR2 e os dados fornecidos pelo autor(a).

Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência

Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva

CRB: 15/120

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.

JOSÉ FILIPE DE LIMA

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES ELETROMAGNÉTICAS DE
MATERIAIS VÍTREOS PARA DESENVOLVIMENTO DE SUPERFÍCIE
SELETIVA EM FREQUÊNCIA COM SUBSTRATO DE VIDRO PARA
APLICAÇÃO EM COMUNICAÇÃO *INDOOR***

Dissertação apresentada ao Mestrado em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado.

Defendida em: 17 /12 / 2021.

BANCA EXAMINADORA



Humberto Dionísio de Andrade, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente



Antônio Sérgio Bezerra Sombra, Prof. Dr. (UFC)
Co-orientador

**Antonio Luiz Pereira de
Siqueira Campos**

Assinado digitalmente por Antonio Luiz Pereira de Siqueira Campos
DN: C=BR, OU=Universidade Federal do Rio Grande do Norte, O=UFRN, CN=Antonio Luiz Pereira de Siqueira Campos, E=ajpsicampos@gmail.com
Razão: Eu sou o autor deste documento
Localização: sua localização de assinatura aqui
Data: 2021.12.18 09:31:53-03'00'
Foxit Reader Versão: 10.3.0

Antonio Luiz Pereira de Siqueira Campos, Prof. Dr. (UFRN)
Membro Examinador

**IDALMIR DE SOUZA QUEIROZ
JUNIOR:63510731468**

Assinado digitalmente por IDALMIR DE SOUZA QUEIROZ JUNIOR:63510731468
DN: CN=IDALMIR DE SOUZA QUEIROZ JUNIOR:63510731468, OU=UFERSA -
Universidade Federal Rural do Semi-Árido, O=ICPEdu, C=BR
Razão: Eu sou o autor deste documento
Localização: sua localização de assinatura aqui
Data: 2021.12.17 18:50:12-03'00'
Foxit Reader Versão: 10.1.1

Idalmir de Sousa Queiroz Júnior, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as coisas boas que realiza em minha vida e pela força concedida para a elaboração deste trabalho.

Aos meus pais, Maria Elisabete de Lima e Francisco de Assis Neto, pelo incentivo e orientação, além de todos os sacrifícios feitos em prol da minha educação.

Aos meus irmãos, Francisco das Chagas de Lima, Maria Francimara de Lima e Francisca Flaviane de Lima, por sempre estarem comigo e me apoiarem em todos os momentos.

Ao meu amigo e colega de curso, Romeu Holanda, por todo o apoio e companheirismo durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos amigos e colegas de laboratório, Leonardo, Emerson, Rafael, Daniel, Matheus Emanuel e Elias por todo o auxílio prestado no desenvolvimento deste trabalho.

A todos os meus familiares e amigos que contribuíram de forma direta ou indireta para a elaboração desta pesquisa.

Ao meu orientador Humberto Dionísio de Andrade e ao co-orientador Antônio Sérgio Bezerra Sombra pela orientação, confiança, paciência e disponibilidade durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Marcelo e a todos do LOCEM, pela atenção prestada e auxílio no tratamento térmico das amostras de vidro.

Ao professor Isaac Barros, por todo o auxílio durante as medições necessárias para o desenvolvimento deste trabalho.

A professora Samanta Mesquita de Holanda e ao amigo Juan Guerra, pelo suporte na aquisição de equipamentos para as medições no espaço livre.

A yoon hyeran e eun ha, pelo auxílio na descoberta de um novo caminho.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento deste trabalho.

“Com a força que Cristo me dá, posso enfrentar qualquer situação”.

Filipenses 4 - 13

RESUMO

Superfícies Seletivas em Frequência (*FSS*) vem sendo utilizadas nas mais diversas aplicações, atuando como filtros espaciais para ondas eletromagnéticas. Tais estruturas podem ser empregadas na melhoria do conforto térmico em ambientes, por meio do bloqueio na troca de calor entre ambientes externos e internos. Também podem ser aplicadas na melhoria da segurança e qualidade de sinal em redes de comunicação sem fio, em ambientes *indoors*. Logo, houve um aumento nos estudos e desenvolvimento de *FSS* aplicadas em superfícies de vidro, para o desenvolvimento de janelas capazes de realizar a filtragem de sinais. Assim, este trabalho tem o objetivo de realizar o estudo e o desenvolvimento de uma *FSS* com substrato de vidro, que realize o bloqueio de sinais na frequência de 2,4 GHz, seguindo os padrões *IEEE 802.11b/g*, para aplicação em ambientes de comunicação *indoor*. Para projetar a estrutura com desempenho satisfatório, foi realizado um estudo de alguns parâmetros eletromagnéticos do substrato de vidro e o efeito do tratamento térmico nos mesmos. Foram construídas duas *FSS*, uma com substrato de vidro comum e outra com substrato tratado termicamente. O elemento escolhido foi à espira quadrada simples, sendo a mesma projetada por meio do Modelo de Circuito Equivalente (MCE), modelada e simulada usando-se o *Ansoft software High Frequency Structure Simulator (HFSS®)*. As estruturas foram medidas por meio do método de transmissão e reflexão no espaço livre. As *FSS* apresentaram desempenho satisfatório, atuando como filtro rejeita-faixa no intervalo especificado para a maioria dos ângulos de incidência, sendo observada uma melhora da estabilidade angular da *FSS* após o tratamento térmico do substrato, com exceção para o ângulo de 10° na polarização vertical. A estrutura proposta apresenta potencial para aplicação na melhoria da qualidade do sinal e segurança dos usuários de redes *WLAN*.

Palavras-chave: Comunicação *indoor*. Substrato de vidro. Superfícies seletivas em frequência. Tratamento térmico em vidro.

ABSTRACT

Frequency Selective Surfaces (FSS) have been used in the most diverse applications, acting as spatial filters for electromagnetic waves. Such structures can be used to improve thermal comfort in environments, by blocking heat exchange between indoor and outdoor environments. They can also be applied to improve security and signal quality in indoor wireless communication networks. Therefore, there has been an increase in the studies and development of FSS applied on glass surfaces, for the development of windows capable of filtering signals. Thus, this work aims to study and develop an FSS with a glass substrate that blocks signals at 2.4 GHz, following the IEEE 802.11b/g standards, for application in indoor communication environments. To design the structure with satisfactory performance, a study of some electromagnetic parameters of the glass substrate and the effect of heat treatment on them was performed. Two FSS were built, one with ordinary glass substrate and the other with heat-treated substrate. The element chosen was the simple square loop, which was designed by means of the Equivalent Circuit Model (ECM), modeled and simulated using the Ansoft software High Frequency Structure Simulator (HFSS[®]). The structures were measured using the transmission and reflection method in free space. The FSS showed satisfactory performance, acting as a band-stop filter in the specified range for most of the incidence angles, and an improvement of the angular stability of the FSS was observed after the substrate heat treatment, except for the 10° angle in the vertical polarization. The proposed framework presents potential for application in improving signal quality and security for users of WLAN networks.

Keywords: Indoor communication. Glass substrate. Frequency selective surfaces. Heat treatment on glass.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Elementos comuns de <i>FSS</i> : (a) Elementos do grupo 1 (b) Elementos do grupo 2 (c) Elementos do grupo 3 (d) Elementos do grupo 4.	26
Figura 2 - Elemento unitário de <i>FSS</i> composto a partir da convolução do dipolo: (a) Vista superior (b) Vista inferior (c) Cada segmento de dipolo usado para compor o elemento.	28
Figura 3 - Arranjo de <i>FSS</i> com geometria fractal, em forma triangular.....	28
Figura 4 - Relação do tipo do elemento da <i>FSS</i> com sua resposta em frequência, sendo a parte condutora representada em laranja: (a) <i>FSS</i> com comportamento de um filtro passa-baixa (b) <i>FSS</i> apresentando o comportamento de um filtro passa-alta (c) <i>FSS</i> apresentando o comportamento de um filtro rejeita-faixa (d) <i>FSS</i> apresentando o comportamento de um filtro passa-faixa.	30
Figura 5 – Componentes de circuitos elétricos associados às <i>FSS</i>	31
Figura 6 - Modelo de linha de transmissão para análise de <i>FSS</i>	32
Figura 7 - <i>FSS</i> composta por um arranjo de <i>patches</i> condutores.	33
Figura 8 - Modelo para análise para a polarização vertical a partir do formalismo proposto por Marcuvitz: (a) Posição do vetor campo elétrico (b) Parâmetros físicos das fitas e ângulo de incidência da onda eletromagnética (c) Circuito equivalente associado.	34
Figura 9 - Modelo de análise a partir do formalismo de Marcuvitz para polarização horizontal: (a) Posição do vetor campo magnético em relação às fitas (b) Parâmetros físicos considerados (c) Circuito equivalente associado.....	35
Figura 10 - <i>FSS</i> com elemento do tipo espira quadrada: (a) Parâmetros físicos considerados para análise (b) Circuito equivalente associado.	36
Figura 11 – Incidência normal e oblíqua de uma onda eletromagnética sobre uma <i>FSS</i>	38
Figura 12 - <i>FSS</i> aplicada na porta do forno de micro-ondas para a filtragem de ondas eletromagnéticas.	39
Figura 13 - <i>FSS</i> aplicada como subrefletor para comunicação via satélite.	40
Figura 14 - <i>FSS</i> aplicada para o desenvolvimento de uma antena <i>patch</i> de alto ganho e grande largura de banda.....	40
Figura 15 - Ilustração de uma janela economizadora de energia. A mesma impede a troca de calor entre os ambientes externo e interno, porém permite a entrada de sinais de comunicação e a luz visível.	41
Figura 16 - <i>FSS</i> com característica passa-faixa, para permitir a entrada de sinais num intervalo de frequência de 900 MHz a 2000 MHz.....	42

Figura 17 - <i>FSS</i> projetada em vidro de janela para bloqueio de sinais <i>UMTS</i> de 2 GHz. Em destaque o tipo de elemento utilizado.	43
Figura 18 - <i>FSS</i> impressa em superfície de vidro para bloqueio de sinais na frequência de 2 GHz, com antena <i>FM</i> integrada para uma faixa de frequência de 87,5 MHz a 108 MHz. A estrutura encontra-se no interior de uma câmara anecoica para medição.	43
Figura 19 - Estrutura cristalina do silicato representada por um tetraedro de SiO_4^{4-}	45
Figura 20 - Arranjo hipotético de uma estrutura composta por Al_2O_3 : (a) Forma cristalina (b) Forma vítrea.	48
Figura 21 - Parte externa de um forno utilizado para a fabricação do vidro plano ou <i>float</i>	49
Figura 22 – Vidro plano na parte final de fabricação após a saída do forno.	50
Figura 23 - Utilização de vidro para fechamento de uma edificação.	50
Figura 24 - Concentração dos componentes que compõem o vidro plano ou <i>float</i>	51
Figura 25 - Estrutura atômica do vidro sodo-cálcico, contendo os seus principais componentes.	51
Figura 26 - Comparação da dependência do volume específico com a temperatura para materiais cristalinos e não cristalinos.	52
Figura 27 - Viscosidade como função da temperatura para alguns tipos comuns de vidro.	55
Figura 28 - Variação da permissividade relativa com a temperatura para alguns tipos comuns de vidro.	57
Figura 29 - Efeitos do aumento da temperatura na tangente de perdas do vidro comercial.	57
Figura 30 - Pequeno forno elétrico usado para tratamento térmico em amostras.	58
Figura 31 - Efeito do tratamento térmico em amostras de vidro com grande quantidade de sílica e adição de titânio: (a) Medições realizadas em uma frequência de 1 kHz (b) Medições realizadas em uma frequência de 1 MHz.	59
Figura 32 - Comportamento da constante dielétrica das amostras de vidro com a variação da temperatura medida em diferentes frequências: (a) Amostra G1 (b) Amostra G2 e (c) Amostra G3.	61
Figura 33 - Sistema de comunicação através do espaço livre com o uso de antenas.	64
Figura 34 - Topologia para <i>WLAN</i> segundo o padrão <i>IEEE 802.11</i>	65
Figura 35 - Configuração geral para utilização do método de reflexão usando-se uma linha de transmissão.	67
Figura 36 - Configurações básicas para utilização do método de reflexão no espaço livre: (a) Método de reflexão de curto-circuito (b) Método do suporte de metal móvel (c) Método de reflexão bi estático.	68

Figura 37 - Modelo para análise de incidência de uma onda eletromagnética em amostra no espaço livre.	70
Figura 38 - <i>Setup</i> para medição da resposta em frequência de uma <i>FSS</i> usando-se o método transmissão e reflexão no espaço livre. Neste caso foi feito o uso de absorvedores para diminuir o efeito de difração nas bordas.	71
Figura 39 - <i>Setup</i> para medição de <i>FSS</i> com o uso de lentes para concentrar a onda eletromagnética no espaço onde está a amostra. O uso das lentes aumenta de forma significativa à precisão dos resultados obtidos.	72
Figura 40 - <i>Setup</i> para medição da resposta em frequência de uma <i>FSS</i> dentro de uma câmara anecoica.	72
Figura 41 - Amostras dos tipos de vidro escolhidos.	75
Figura 42 - Detalhe das camadas do vidro laminado.	75
Figura 43 - <i>Setup</i> utilizado para caracterização das amostras.	76
Figura 44 - Amostras de vidro antes do tratamento térmico.	77
Figura 45 – Tipo de forno utilizado no tratamento térmico: (a) Parte externa (b) Parte interna.	77
Figura 46 - Caracterização das amostras após o tratamento térmico.	79
Figura 47 - Parâmetros físicos considerados para a espira quadrada.	80
Figura 48 – Simulação da <i>FSS</i> : (a) Medição da resistência da fita de cobre (b) Ambiente de simulação.	83
Figura 49 - Estudo paramétrico da espessura w da espira.	83
Figura 50 - Dimensões finais da <i>FSS</i> em mm.	84
Figura 51 - Variação do ângulo de incidência no plano de elevação: (a) Polarização vertical (b) Polarização horizontal.	85
Figura 52 – Sistema utilizado para medir a variação do ângulo de incidência.	86
Figura 53 - Amostras de vidro utilizadas como substrato.	87
Figura 54 – Forno utilizado no processo de tratamento térmico do substrato da <i>FSS</i>	87
Figura 55 – Materiais utilizados para construção: (a) Substrato de vidro e fita de cobre (b) Substrato revestido.	88
Figura 56 – Processo de impressão da <i>FSS</i> no substrato de vidro.	88
Figura 57 - <i>FSS</i> durante o processo de retirada do excesso de cobre.	89
Figura 58 - <i>FSS</i> com substrato comum finalizada e pronta para ser medida.	89
Figura 59 – <i>Setup</i> utilizado para medição das <i>FSS</i> : (a) <i>Setup</i> completo (b) Detalhe do afastamento.	90

Figura 60 – Parâmetros do vidro temperado antes do tratamento térmico: (a) Constante dielétrica (b) Constante de perdas (c) Condutividade (d) Tangente de perdas.....	92
Figura 61 – Parâmetros do vidro laminado antes do tratamento térmico: (a) Constante dielétrica (b) Constante de perdas (c) Condutividade (d) Tangente de perdas.....	94
Figura 62 - Parâmetros eletromagnéticos do vidro bronze: (a) Constante dielétrica (b) Constante de perdas (c) Condutividade (d) Tangente de perdas.	95
Figura 63 - Efeito do tratamento térmico na aparência do vidro temperado.....	96
Figura 64 - Evolução dos parâmetros do vidro temperado com o processo de tratamento térmico: (a) Constante dielétrica (b) Constante de perdas (c) Condutividade (d) Tangente de perdas.....	97
Figura 65 - Comportamento da constante dielétrica em função da temperatura de tratamento: (a) Constante dielétrica (b) Demais parâmetros.	99
Figura 66 - Amostras de vidro laminado após o tratamento térmico.	99
Figura 67 - Evolução do valor médio dos parâmetros do vidro laminado: (a) Constante dielétrica (b) Constante de perdas (c) Condutividade (d) Tangente de perdas.....	100
Figura 68 - Evolução do valor médio dos parâmetros para diferentes temperaturas de tratamento: (a) Constante dielétrica (b) Demais parâmetros.	101
Figura 69 - Efeitos do tratamento térmico na aparência do vidro bronze.	102
Figura 70 - Efeitos do tratamento térmico nos parâmetros do vidro bronze: (a) Constante dielétrica (b) Constante de perdas (c) Condutividade (d) Tangente de perdas.....	103
Figura 71 - Efeitos da elevação da temperatura de tratamento nos parâmetros do vidro bronze: (a) Constante dielétrica (b) Demais parâmetros.	104
Figura 72 – Comparação entre os resultados simulados e medidos para a FSS com substrato de vidro comum: (a) Incidência normal (b) Incidência de 10° (c) Incidência de 20° (d) Incidência de 30°.	106
Figura 73 - Análise de estabilidade angular para polarização vertical: (a) Simulado (b) Medido.	107
Figura 74 - Resultado simulado e medido para polarização horizontal: (a) Incidência normal (b) Incidência de 10° (c) Incidência de 20° (d) Incidência de 30°.	109
Figura 75 - Análise de estabilidade angular para polarização horizontal: (a) Simulado (b) Medido.....	110
Figura 76 - Substrato de vidro tratado termicamente.	112
Figura 77 - Diminuição da transparência do substrato: (a) Objeto visto diretamente (b) Objeto visto através do vidro tratado.....	112

Figura 78 - Efeitos do tratamento térmico nos parâmetros do substrato de vidro bronze: (a) Constante dielétrica (b) Constante de perdas (c) Condutividade (d) Tangente de perdas.....	113
Figura 79 - <i>FSS</i> construída sobre o substrato de vidro tratado termicamente.	114
Figura 80 - Comparação entre os resultados simulados e medidos para a <i>FSS</i> com substrato de vidro comum: (a) Incidência normal (b) Incidência de 10° (c) Incidência de 20° (d) Incidência de 30°.....	115
Figura 81 - Análise de estabilidade angular para polarização vertical: (a) Simulado (b) Medido.	116
Figura 82 - Resultado simulado e medido para polarização horizontal: (a) Incidência normal (b) Incidência de 10° (c) Incidência de 20° (d) Incidência de 30°.	118
Figura 83 - Análise de estabilidade angular para polarização horizontal: (a) Simulado (b) Medido.....	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise comparativa entre os diferentes tipos de elementos de <i>FSS</i>	29
Tabela 2 - Percentual de caráter iônico para algumas cerâmicas comuns.....	45
Tabela 3 - Composição de alguns vidros comerciais comuns.	47
Tabela 4 - Coeficiente de expansão térmica para diferentes valores de temperatura para o vidro de sílica.	53
Tabela 5 - Condutividade térmica do vidro constituído de sílica para um intervalo de temperatura de -173 °C a 300 °C.....	54
Tabela 6 - Módulo da constante elástica de Young para o vidro a base de sílica em diferentes temperaturas.....	56
Tabela 7 - Código das amostras de vidro com aditivos de TiO_2 e condições do tratamento térmico aplicado.	59
Tabela 8 - Padrões <i>IEEE</i> para as redes <i>WLAN</i>	65
Tabela 9 – Dimensões das amostras de vidro.....	76
Tabela 10 - Classificação das amostras de vidro para o tratamento térmico.....	78
Tabela 11 - Variáveis de entrada para o algoritmo de dimensionamento da <i>FSS</i>	81
Tabela 12 - Dimensões da <i>FSS</i> obtidas por meio do algoritmo.	82
Tabela 13- Dimensões finais dos elementos da <i>FSS</i>	84
Tabela 14 - Características de ressonância da <i>FSS</i> simulada.	84
Tabela 15 - Valores médios dos parâmetros eletromagnéticos da amostra de vidro temperado para a frequência de 2,45 GHz.	93
Tabela 16 - Parâmetros para a amostra de vidro laminado medidos a frequência de 2,45 GHz.	94
Tabela 17 - Valores médios dos parâmetros medidos a frequência de 2,45 GHz.	95
Tabela 18 – Parâmetros do vidro temperado medidos à frequência de 2,45 GHz.	98
Tabela 19 - Parâmetros do vidro laminado medidos à frequência de 2,45 GHz.	101
Tabela 20 - Parâmetros do vidro bronze medidos à frequência de 2,45 GHz.	104
Tabela 21 - Comparativo entre os processos de tratamento com maior efeito na permissividade relativa.	105
Tabela 22 - Resumo numérico da análise de estabilidade angular para polarização vertical.	107
Tabela 23 - Razão para os parâmetros frequência de ressonância e largura de banda entre o valor no ângulo de apresentou maior variação e a incidência normal.	108
Tabela 24 - Resultados da análise de estabilidade angular para a polarização vertical.....	108

Tabela 25 - Dados numéricos dos gráficos da Figura 75.	110
Tabela 26 - Razão para os parâmetros frequência de ressonância e largura de banda entre o valor no ângulo de apresentou maior variação e a incidência normal.	110
Tabela 27 - Resultado da análise de estabilidade angular para a polarização horizontal.	111
Tabela 28 – Valor médio dos parâmetros eletromagnéticos do substrato tratado medidos na frequência de 2,45 GHz.	114
Tabela 29 - Resumo numérico da análise de estabilidade angular para polarização vertical.	116
Tabela 30 - Razão para os parâmetros frequência de ressonância e largura de banda entre o valor no ângulo de apresentou maior variação e a incidência normal.	117
Tabela 31 - Resultados da análise de estabilidade angular para a polarização vertical.	117
Tabela 32 - Dados numéricos dos gráficos da Figura 83.	119
Tabela 33 - Razão para os parâmetros frequência de ressonância e largura de banda entre o valor no ângulo de apresentou maior variação e a incidência normal.	119
Tabela 34 - Resultado da análise de estabilidade angular para a polarização horizontal.	120
Tabela 35 - Razão da frequência de ressonância e largura de banda antes e após o processo de tratamento térmico.	120
Tabela 36 - Variação da frequência de ressonância da <i>FSS</i> em MHz antes e após o processo de tratamento térmico.	121

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DAK - Dielectric Assessment Kit

BW - BandWidth

FDTD - Finite-Difference Time-Domain

FEM - Finite Element Method

FM - Frequency Modulation

FSS - Frequency Selective Surface

HFSS - High Frequency Structure Simulator

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers

LOCEM - Laboratório de Telecomunicações e Ciência e Engenharia de Materiais

LTE - Long Term Evolution

MANET - Mobile Ad hoc Network

MCE - Modelo do Circuito Equivalente

MoM - Method of Moments

PET - Polyethylene Terephthalate

UFC - Universidade Federal do Ceará

UMTS - Universal Mobile Telecommunications System

VNA - Vectorial Network Analyzer

Wi-Fi - Wireless Fidelity

WiMAX - Worldwide Interoperability for Microwave Access

WLAN - Wireless Local Area Network

WWAN - Wireless Wide Area Network

LISTA DE SÍMBOLOS

\vec{E} – Vetor campo elétrico

Z_0 – Impedância do espaço livre

Y - Admitância no modelo de linha de transmissão

τ – Coeficiente de transmissão

φ – Ângulo de incidência da polarização vertical

X_L – Reatância indutiva

π – Constante Pi

λ – Comprimento de onda

θ – Ângulo de incidência da polarização horizontal

B_C – Susceptância capacitiva

ϵ_r - Permissividade relativa

Γ – Coeficiente de reflexão

T_v - Temperatura de transição vítrea

T_f - Temperatura de fusão do vidro

ϵ' - Constante dielétrica

ϵ'' - Constante de perdas

σ – condutividade

S_{11} – Coeficiente de reflexão

S_{21} – Coeficiente de transmissão

μ_r – Permeabilidade magnética relativa

$\tan\delta$ – Tangente de perdas

Δ – constante delta que define a espessura da espira em função do seu tamanho

\vec{H} – Vetor campo magnético

Ψ – Ângulo de incidência da onda eletromagnética sobre a *FSS*.

f_r – Frequência de ressonância da *FSS*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	22
1.1 Objetivo geral	23
1.2 Objetivos específicos.....	23
1.3 Estrutura da dissertação.....	24
2 REFERENCIAL TEÓRICO	25
2.1 Superfícies Seletivas em Frequência.....	25
2.1.1 Introdução	25
2.1.2 Forma dos elementos.....	26
2.1.3 Tipo do elemento.....	29
2.1.4 Técnicas de análise.....	31
2.1.4.1 Espira quadrada	36
2.1.5 Estabilidade angular de <i>FSS</i>	37
2.1.6 Aplicações de <i>FSS</i>	39
2.1.7 <i>FSS</i> aplicadas em vidro	41
2.2 Materiais cerâmicos e vítreos	44
2.2.1 Vidro.....	46
2.2.2 Vidros aplicados em janelas e fachadas de prédios	49
2.2.3 Propriedades térmicas do vidro	52
2.2.4 Propriedades mecânicas do vidro.....	54
2.2.5 Características eletromagnéticas do vidro.....	56
2.2.5.1 Efeito do tratamento térmico nas propriedades eletromagnéticas do vidro.....	58
2.3 Comunicação em ambientes <i>indoor</i>	62
2.3.1 Tecnologia de comunicação sem fio	63
2.3.2 Padrões <i>IEEE</i> para redes <i>WLAN</i>	64
2.4 Técnicas de medição	66
2.4.1 Método de reflexão da linha coaxial	66

2.4.2 Método de reflexão no espaço livre	67
2.4.3 Método de transmissão/reflexão no espaço livre	70
3 MATERIAIS E MÉTODOS	73
3.1 Determinação da frequência de operação	74
3.2 Determinação do tipo de elemento utilizado	74
3.3 Especificações das amostras de vidro	74
3.4 Tratamento térmico das amostras	77
3.5 Dimensionamento da FSS	79
3.6 Análise de estabilidade angular	85
3.7 Construção das FSS para medição	86
3.8 Medição das FSS	90
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	91
4.1 Parâmetros eletromagnéticos iniciais das amostras de vidro	91
4.1.1 Parâmetros eletromagnéticos do vidro temperado	91
4.1.2 Parâmetros eletromagnéticos do vidro laminado	93
4.1.3 Parâmetros eletromagnéticos do vidro bronze	95
4.2 Efeitos do tratamento térmico	96
4.2.1 Efeitos no tratamento térmico no vidro temperado	96
4.2.2 Efeitos do tratamento térmico no vidro laminado	99
4.2.3 Efeitos do tratamento térmico no vidro bronze	102
4.3 Resultados obtidos para as FSS	105
4.3.1 Resultados obtidos para a FSS com substrato de vidro comum	106
4.3.2 Efeitos do tratamento térmico do substrato de vidro no desempenho da FSS	111
4.3.2.1 Caracterização do substrato	111
4.3.2.2 Efeitos do tratamento térmico na estabilidade angular e frequência de ressonância ..	114
5 CONCLUSÕES	122
6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	124

1 INTRODUÇÃO

Superfícies Seletivas em Frequência, mais conhecidas pela sigla em inglês (*FSS*), vêm sendo estudadas para as mais diversas aplicações nas últimas décadas, como radomes, absorvedores e sub-refletores para sistemas de antenas de banda dupla (MUNK, 2000; LI; XIAO; BAI; WANG, 2012; GOMES NETO et al., 2020). O estudo de tais estruturas com substrato de vidro para o desenvolvimento de janelas capazes de realizar o controle do fluxo de energia entre os ambientes internos e externos recebeu bastante atenção nos últimos anos (GUSTAFSSON et al., 2006; KIANI; ALDHAHERI, 2014). Essas janelas são capazes de impedir a entrada de calor do ambiente externo para o interno no verão, apresentando comportamento inverso no inverno, sendo denominadas de janelas economizadoras de energia ou de baixa emissividade (RISSMAN; KENNAN, 2013). Estudos também vêm sendo realizados para o desenvolvimento de janelas capazes de realizar o bloqueio de sinais de comunicação sem fio em ambientes de comunicação *indoor*, com o objetivo de melhorar a qualidade do mesmo e a segurança dos usuários (ITOU et al., 2004; KIANI; WEILY; ESSELLE, 2006; NÓBREGA, 2013; XIONG et al., 2015; PAKDIN et al., 2019).

A comunicação sem fio de dispositivos com a Internet exige uma maior preocupação com a segurança dos usuários, uma vez que se a informação transmitida não estiver criptografada, a mesma pode ser interceptada e interpretada por um dispositivo que esteja conectado na rede (NEWBOLD, 2004). *Wireless Local Area Network (WLAN)* é a tecnologia mais utilizada pelas famílias para a comunicação de dispositivos por meio do *Wireless Fidelity (Wi-Fi)*, sendo o vidro que compõe as janelas um meio cujo sinal de comunicação sem fio atravessa com facilidade, diminuindo a densidade e a qualidade do sinal no ambiente *indoor* (SOHAIL; ESSELLE; KIANI, 2012; XIONG et al., 2015). Uma janela revestida com *FSS* capaz de realizar o bloqueio de sinais foi apresentada em Dewani et al. (2018). Em Liu et al. (2020) foi adicionada uma antena operando na banda *FM*, acrescentando funcionalidade a janela proposta. Nessas aplicações, a *FSS* tem como substrato o vidro da própria janela, fazendo-se necessário o conhecimento de algumas propriedades eletromagnéticas do mesmo.

O vidro é uma substância fisicamente homogênea, obtido a partir do resfriamento de uma massa inorgânica em fusão, apresentando a característica de solidificar-se a partir de um aumento contínuo de viscosidade (BABISK, 2009). Eles são constituídos por silicatos não cristalinos adicionados de outros óxidos como CaO , Na_2O , K_2O e Al_2O_3 , que influenciam em

suas propriedades (CALLISTER JUNIOR, 2000). Uma vez que o vidro é utilizado como substrato da *FSS* na aplicação proposta neste trabalho, a permissividade relativa do mesmo torna-se um parâmetro importante, pois a mesma influência no desempenho da estrutura (GOMES NETO et al., 2020). Neste trabalho é realizado o estudo e desenvolvimento de uma *FSS* com substrato de vidro, para realizar o bloqueio de sinais *WLAN* na frequência de 2,4 GHz dos padrões *IEEE* 802.11 b/g, atuando como filtro rejeita-faixa no intervalo de 2,4000 GHz – 2,4835 GHz. Foi feito um tratamento térmico no substrato de vidro utilizado e verificado os seus efeitos no desempenho da estrutura. O estudo apresenta contribuições para o desenvolvimento de janelas que atuam como filtros espaciais, bem como para aplicações de *FSS* cujo substrato utilizado seja o vidro.

1.1 Objetivo geral

Realizar o estudo e desenvolvimento de uma *FSS* com substrato de vidro para bloqueio de sinais *WLAN* no intervalo de frequência 2,4000 GHz – 2,4835 GHz, para aplicação em ambientes de comunicação *indoor*.

1.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral proposto acima, este trabalho teve os seguintes objetivos específicos:

- i) Revisão da literatura a respeito do tema proposto;
- ii) Estudo das propriedades eletromagnéticas do substrato de vidro;
- iii) Projeto, modelagem e simulação de *FSS* com substrato de vidro para o bloqueio de ondas eletromagnéticas no intervalo de frequência 2,4000 GHz – 2,4835 GHz e que apresente estabilidade angular;
- iv) Tratamento térmico em amostras de vidro, comumente utilizados em janelas e fachadas de prédios, para estudo dos efeitos nas propriedades eletromagnéticas delas;
- v) Construção das *FSS* com substrato de vidro comum e tratado termicamente;
- vi) Medição e estudo de estabilidade angular e independência de polarização das estruturas, fazendo-se uma comparação entre os resultados simulados e medidos.

1.3 Estrutura da dissertação

O Capítulo 2 aborda o conhecimento teórico necessário ao desenvolvimento desta pesquisa. Primeiro são apresentados conceitos fundamentais sobre *FSS*, sendo em seguida apresentados conceitos sobre materiais vítreos, comunicação sem fio em ambientes indoor e, por fim, são apresentadas algumas técnicas de medição.

O Capítulo 3 trata sobre os materiais e métodos utilizadas na obtenção dos resultados da pesquisa.

No Capítulo 4 são abordados os resultados obtidos na pesquisa, bem como é feita uma discussão e comparação deles com os obtidos em outros trabalhos.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas por meio da análise dos resultados.

O Capítulo 6 apresenta sugestões de trabalhos futuros com base nos resultados obtidos nesta pesquisa.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção será apresentada a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento do trabalho proposto. Primeiramente, serão vistos conceitos fundamentais sobre *FSS*, sendo em seguida feita uma conceituação sobre o vidro utilizado em fachadas e janelas na construção civil, apresentando-se suas propriedades mecânicas e elétricas. A próxima etapa consiste na apresentação dos conceitos envolvidos na comunicação sem fio em ambientes *indoor*, por meio do padrão *IEEE* 802.11. Por último, serão vistas as técnicas utilizadas para medição e caracterização das propriedades eletromagnéticas dos materiais utilizados no trabalho.

2.1 Superfícies Seletivas em Frequência

Nesta seção serão vistos os conceitos fundamentais sobre *FSS*, necessários ao desenvolvimento do trabalho.

2.1.1 Introdução

Uma *FSS* é uma estrutura periódica que exhibe propriedades de transmissão ou reflexão, em função da frequência da onda eletromagnética incidente, atuando como um filtro espacial para a mesma (MUNK, 2000). Seu desenvolvimento teve início a partir das observações de Francis Hopkinson, relatadas ao físico David Rittenhouse, que após realizar alguns estudos, constituiu o desenvolvimento da grade de difração óptica (SEGUNDO, 2014). Rittenhouse construiu um aparato de fios espaçados igualmente entre si, observando a filtragem da luz branca dentro de distintos comprimentos de onda quando o colocou em direção a luz. Havia um espaçamento igual entre as linhas coloridas observadas em relação à linha central, que pertencia à luz branca (CAMPOS, 2009).

A Pesquisa desenvolvida por Rittenhouse apresentou a dependência da resposta em frequência com as dimensões físicas, formando a base dos princípios da tecnologia por trás das *FSS* (FERNANDES, 2016). A partir daí, houve um aumento no estudo de tais estruturas, devido a sua constituição simples e eficiência de funcionamento. Segundo Munk (2000), tais dispositivos podem ter sua estrutura formada por elementos condutores ou por aberturas, sendo que as do primeiro tipo apresentam o comportamento de um filtro rejeita-faixa, enquanto as do segundo comportam-se como um filtro passa-faixa.

Devido ao seu potencial para aplicações militares, houve um grande interesse em pesquisas relacionadas à *FSS* a partir dos anos 1960 (MUNK, 2000). A partir de tais estudos surgiram técnicas de análise e projeto de *FSS*, buscando-se melhorar o desempenho das estruturas desenvolvidas para as diversas utilidades. Propriedades como frequência de ressonância e largura de banda depende de aspectos físicos da estrutura como o tipo, a forma, dimensão e a periodicidade dos elementos utilizados, bem como o tipo e espessura do dielétrico (LUUKKONEN et al., 2009). Isso acontece devido aos parâmetros anteriores sofrerem influência do comprimento de onda incidente (ULLAH et al., 2011). Assim, a escolha do tipo de elemento deve estar relacionada à aplicação e aos objetivos a serem alcançados.

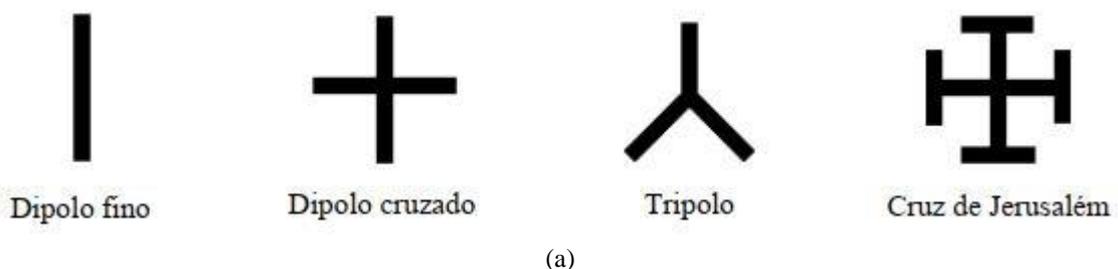
2.1.2 Forma dos elementos

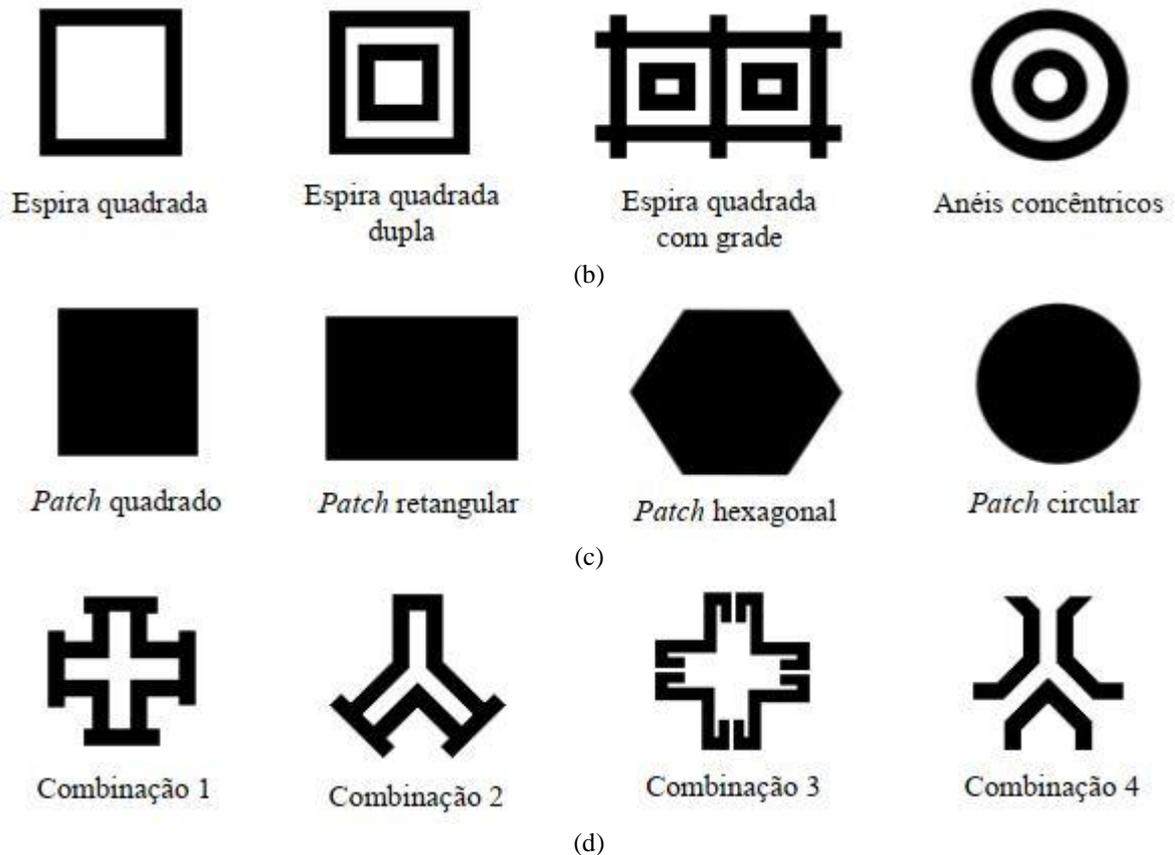
Atualmente há na literatura uma grande variedade de formas de elementos de *FSS* que apresentam características diversas como multibanda, banda larga, independência do seu comportamento com a polarização da onda incidente, estabilidade angular entre outras características que podem ser obtidas a partir da combinação de elementos. Munk (2000) divide os elementos das *FSS* em quatro grupos básicos:

- Grupo 1: Conectados ao centro ou N-pólos como dipolos, tripolos, espirais quadradas e cruz de Jerusalém;
- Grupo 2: Tipo *loop* tais como, espira circular, espira quadrada e as espiras hexagonais;
- Grupo 3: Interior sólido, tipo *patches*, das mais diversas formas;
- Grupo 4: Combinações dos grupos anteriores.

A Figura 1 apresenta algumas *FSS* dos grupos mencionados anteriormente.

Figura 1 - Elementos comuns de *FSS*: (a) Elementos do grupo 1 (b) Elementos do grupo 2 (c) Elementos do grupo 3 (d) Elementos do grupo 4.

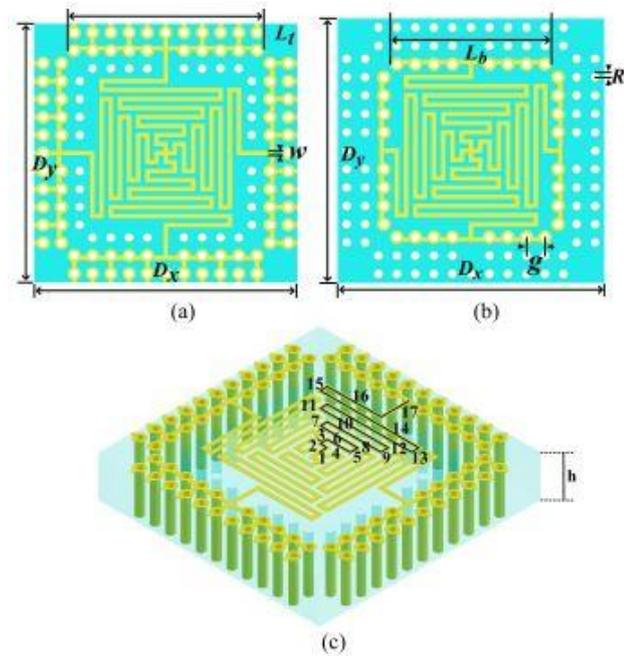




Fonte: Moura, 2015.

Além dos grupos mencionados anteriormente existem ainda os elementos formados por fractais e os convolucionais (ZHAO et al., 2020). A utilização de fractais insere novas bandas de operação na *FSS*, reduzindo também a estrutura, além de permitir o desenvolvimento de filtros espaciais compactos (SEGUNDO, 2014; SEMAN; KHALID, 2014; PALANGE; SONKER; YADAV, 2016). Já o uso dos elementos convolucionados é comum quando se deseja trabalhar com superfícies curvas (HABIB; KIANI; BUTT, 2019; ZHAO et al., 2020). A Figura 2 apresenta um elemento unitário de uma *FSS* composto a partir da convolução de dipolos.

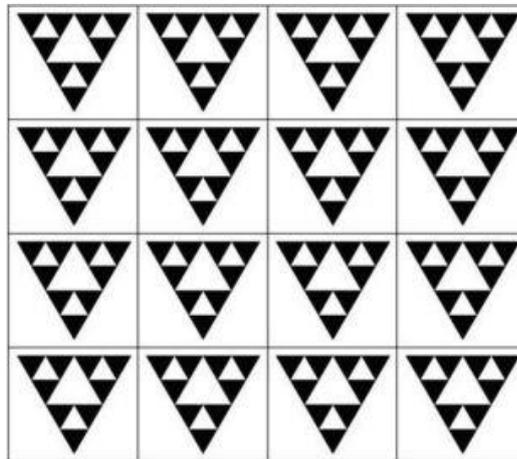
Figura 2 - Elemento unitário de *FSS* composto a partir da convolução do dipolo: (a) Vista superior (b) Vista inferior (c) Cada segmento de dipolo usado para compor o elemento.



Fonte: Zhao et al., 2020.

Na Figura 3 está apresentada uma *FSS* com geometria de fractal.

Figura 3 - Arranjo de *FSS* com geometria fractal, em forma triangular.



Fonte: Adaptado de Palange, Sonker e Yadav, 2016.

Como citado anteriormente, os elementos de uma *FSS* podem apresentar formas variadas, sendo a escolha da mesma condicionada ao tipo de aplicação e objetivos a serem alcançados. Wu (1995) apud Barrera (2015) realizou uma análise comparativa entre os tipos clássicos de *FSS* com base em estabilidade angular, níveis de polarização cruzada, largura de banda e pequena separação entre frequências de ressonância. O estudo foi feito considerando-

se as *FSS* na sua forma *freestanding*, ou seja, sem substrato dielétrico (EULER et al., 2010). A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos para os diferentes tipos de estrutura, com critério de pontuação: 1 – Melhor a 4 - Pior.

Tabela 1 - Análise comparativa entre os diferentes tipos de elementos de *FSS*.

Forma do elemento	Estabilidade angular	Nível de polarização cruzada	Largura de banda	Pequena separação entre as frequências ressonantes
Cruz de Jerusalém	2	3	2	2
Anéis	1	2	1	1
Dipolo cruzado	3	3	3	3
Espira quadrada	1	1	1	1
Dipolo	4	1	4	1
Tripolo	3	3	3	2

Fonte: Adaptado de Barrera, 2015.

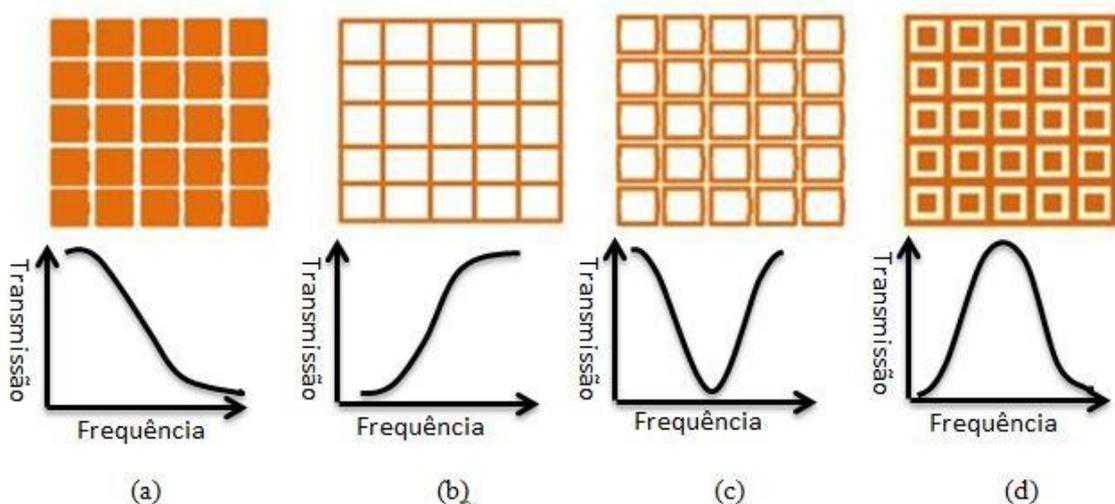
Com base na Tabela 1, pode-se notar que o elemento em forma de espira quadrada apresenta um bom desempenho em todos os critérios considerados. Para a aplicação proposta é importante que a *FSS* apresente uma boa estabilidade angular, uma vez que em um ambiente de comunicação *indoor*, o sinal de comunicação sem fio pode incidir sobre a estrutura em diversos ângulos (GUSTAFSSON et al., 2006; RIBEIRO, 2012). Quando a onda eletromagnética incide de forma oblíqua em uma *FSS*, as dimensões efetivas da estrutura mudam em relação à incidência normal, ocasionando uma mudança na frequência de ressonância (SILVA FILHO, 2018). A estrutura também deve suportar níveis de polarização cruzada e ser capaz de filtrar o sinal em toda a sua largura de banda (QASEM, 2012; FAROOQ; SHAFIQUE; MUGHAL, 2020). Assim, a *FSS* utilizada neste trabalho terá como forma de elemento a espira quadrada.

2.1.3 Tipo do elemento

FSS podem ter como tipo de elemento *patches* condutores sem abertura na parte metálica, forma de grade sem parte condutora na abertura, *patch* condutor com abertura na parte metálica e abertura com uma parte condutora no interior (FERNANDES, 2016; QASEM, 2012). As características de transmissão e reflexão de uma *FSS* como função da frequência, dependem do tipo dos elementos do arranjo (LEE; ZARRILO; LAW, 1982). A partir dessas

estruturas pode-se obter o comportamento dos filtros passa-altas, passa-baixas, rejeita-faixa e passa-faixa, sendo apresentado na Figura 4, o comportamento do coeficiente de transmissão em função da frequência da onda incidente, conforme o tipo do elemento (QASEM, 2012). Como apresentado na Figura 4, *FSS* apresentam um comportamento dual, sendo um caso simples do princípio geral de Babinet para arranjos complementares (LIU; NIE; TAN, 2016). Tomando esse princípio como base, *FSS* rejeita-faixa podem ser obtidas a partir de estrutura passa-faixa e vice-versa, sendo o mesmo princípio aplicável à estrutura passa-altas e passa-baixas (QASEM, 2012). Na Figura 4 está apresentada a relação do elemento da *FSS* com o comportamento do seu coeficiente de transmissão em função da frequência, sendo a parte condutora representada em laranja. Na Figura 4(a) têm-se um elemento tipo *patch* sem aberturas na parte condutora, com comportamento de um filtro passa-baixas. A Figura 4(b) apresenta um elemento tipo abertura sem uma parte condutora na mesma, apresentando o comportamento de um filtro passa-altas. A Figura 4(c) apresenta um elemento tipo *patch* com abertura na parte condutora, apresentando o comportamento de um filtro rejeita-faixa. Já a Figura 4(d) apresenta um elemento tipo abertura com parte condutora na mesma, apresentando o comportamento de um filtro passa-faixa.

Figura 4 - Relação do tipo do elemento da *FSS* com sua resposta em frequência, sendo a parte condutora representada em laranja: (a) *FSS* com comportamento de um filtro passa-baixa (b) *FSS* apresentando o comportamento de um filtro passa-alta (c) *FSS* apresentando o comportamento de um filtro rejeita-faixa (d) *FSS* apresentando o comportamento de um filtro passa-faixa.



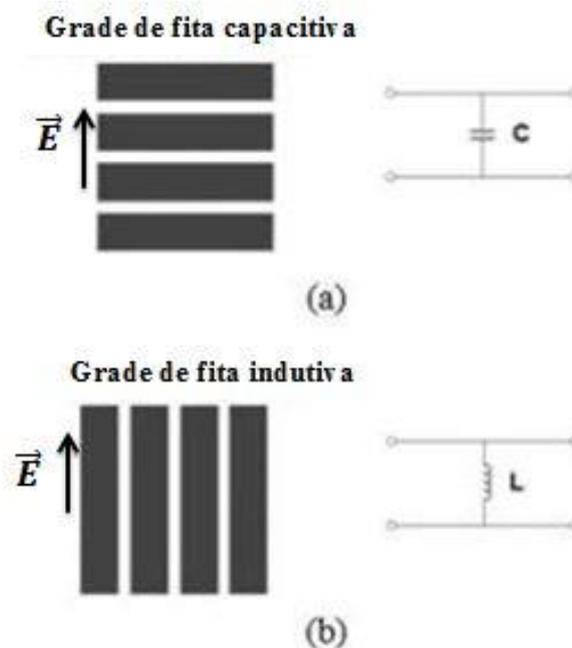
Fonte: Adaptado de Qasem, 2012.

FSS do tipo elemento condutor, ou tipo *patch*, são denominadas de capacitivas, com a característica de rejeita-faixa ou passa-baixa, sendo que, à medida que os elementos vão entrando em ressonância, tem-se uma reflexão da potência incidente na superfície da *FSS*

(MITTRA; CHAN; CWIK, 1988). Já estruturas do tipo abertura, fenda ou *slot*, são denominadas de indutivas, com característica passa-faixa ou passa-alta, tornando-se transparente para a onda incidente à medida que os elementos vão entrando em ressonância (MITTRA; CHAN; CWIK, 1988; MOURA, 2015).

Essas denominações derivam da teoria de circuitos, pois aos diferentes tipos de elementos de *FSS* são associados componentes capacitivos, resistivos e indutivos. A Figura 5 apresenta os elementos capacitivos e indutivos associados a um conjunto de fitas condutoras, levando-se em consideração a posição do vetor campo elétrico (SILVA FILHO, 2018). As partes metálicas da estrutura estão associadas a elementos indutivos e resistivos, enquanto os *gaps* geram o surgimento de elementos capacitivos (GHOSH; SRIVASTAVA, 2015; SAVIA; PARKER, 2003).

Figura 5 – Componentes de circuitos elétricos associados às *FSS*.



Fonte: Adaptado de Silva Filho, 2014.

Com base nesses conceitos para o tipo e a forma dos elementos de uma *FSS*, surgiram técnicas de análise para caracterizar sua resposta em frequências, algumas das quais serão vistas na Subseção 2.1.4.

2.1.4 Técnicas de análise

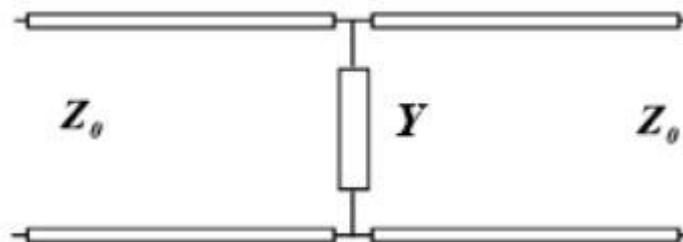
Ao longo dos estudos de *FSS* têm sido usadas várias técnicas de análise e caracterização de tais estruturas, sendo alguns baseados em técnicas numéricas. Fórmulas aproximadas e

simples foram propostas por alguns autores para determinar as características de transmissão e reflexão de *FSS* formadas por elementos condutores ou aberturas (NARAYAN; JHA, 2015). Entretanto, estes métodos aproximados possuem limitações e produzem resultados imprecisos em determinadas aplicações, impulsionando o desenvolvimento de métodos computacionais, sendo possíveis devido ao avanço da tecnologia.

Tem sido dada uma grande atenção ao estudo dos métodos computacionais devido a uma redução do preço de *hardwares* e ao desenvolvimento de *softwares* capazes de fornecer resultados muito precisos. Muitos dos *softwares* comerciais existentes na atualidade são baseados em métodos numéricos como o método dos momentos (*Method of Moments – MoM*), diferenças finitas no domínio do tempo (*Finite-Difference Time-Domain – FDTD*), ou no método dos elementos finitos (*Finite Element Method – FEM*) (ARAÚJO, 2014). No caso de análise de *FSS* alguns autores propuseram algumas fórmulas simples para a obtenção da resposta em frequência das estruturas com um baixo custo computacional.

Considerando-se que o elemento condutor que compõe a *FSS* possui uma espessura nula, a análise pode ser feita por meio de um modelo de linha de transmissão (CAMPOS, 2009). Neste caso as fórmulas aproximadas servem para calcular a admitância da linha de transmissão ao invés de obtê-la por meio de um circuito equivalente. A Figura 6 apresenta um modelo de linha de transmissão usado para análise de *FSS*, sendo Z_0 a impedância do espaço livre e Y a admitância da linha.

Figura 6 - Modelo de linha de transmissão para análise de *FSS*.



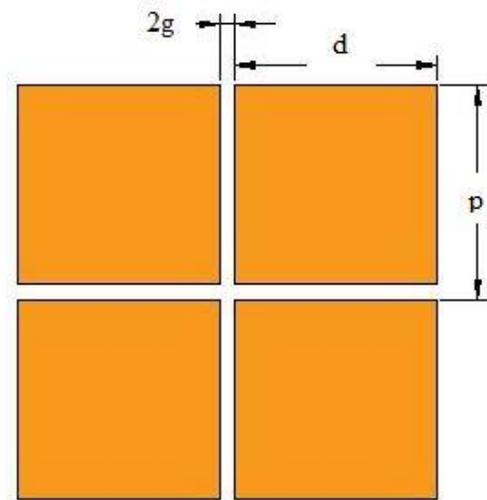
Fonte: Campos, 2009.

Com base no modelo da Figura 6 o coeficiente de transmissão τ da *FSS* pode ser obtido a partir da Equação 1.

$$\tau = \frac{1}{1 + Y} \quad (1)$$

Em seu trabalho, Chen (1973) propôs um método para análise teórica de *FSS* devido às mesmas estarem sendo amplamente utilizadas em sua época. O modelo de Chen é simplificado, mas oferece uma boa precisão quando se deseja conhecer o comportamento da estrutura quanto a sua resposta em frequência. Para apresentar as equações propostas por Chen será considerado o modelo de *FSS* apresentado da Figura 7, que consiste em um arranjo de *patches* condutores, sendo p o período do arranjo, d o tamanho de cada *patch* individual e $2g$ a distância entre dois elementos.

Figura 7 - *FSS* composta por um arranjo de *patches* condutores.



Fonte: Autor, 2021.

Mais detalhes sobre o formalismo matemático proposto por Chen podem ser encontrados em Chen (1973) e Campos (2009).

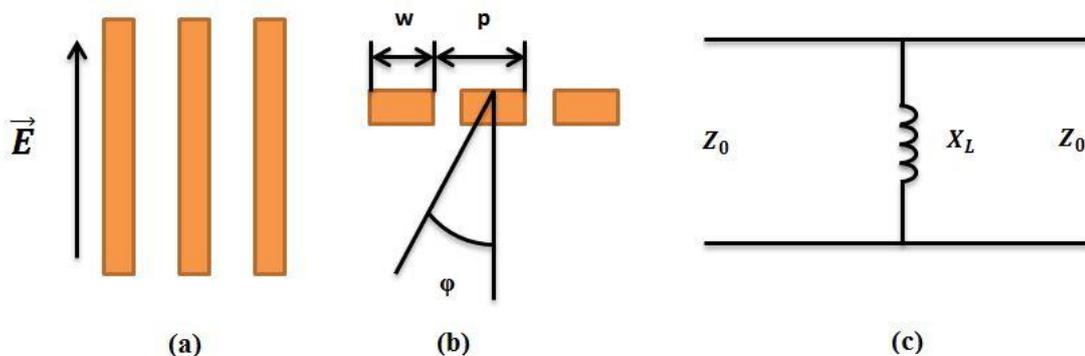
Em seu trabalho, Ulrich (1967) apresenta uma formulação bastante simples, mais do que a proposta por Chen, porém oferecendo pouca precisão. O formalismo matemático é baseado no conceito de linha de transmissão e procura-se obter a admitância da mesma. As equações propostas por Ulrich foram desenvolvidas tomando-se como base a Figura 7.

Os autores Lee, Zarrillo e Law (1982) propuseram uma formulação para o caso de uma onda incidente para um arranjo como o da Figura 7. A mesma apresenta limitações em precisão, sendo válida somente para incidência normal e quando o período p da *FSS* é inferior a um comprimento de onda. Nas análises anteriores foi feita a consideração de que a *FSS* é do tipo *freestanding*, isto é, não há a presença de um dielétrico dando suporte a estrutura. Lee, Zarrillo e Law (1982) levaram esse caso em consideração para o arranjo da Figura 7.

Um método aproximado que apresenta resultados satisfatórios para o projeto e análise de *FSS* é o Modelo do Circuito Equivalente (MCE). O mesmo tem como base teórica a análise feita por Marcuvitz (1951) para um conjunto de fitas condutoras paralelas, com espessura desprezível, dispostas de forma periódica. Nesta análise é feita uma separação entre os modos de incidência para polarização vertical e horizontal, obtendo-se um circuito que represente o comportamento da estrutura com base em seus parâmetros físicos (LIU et al., 2017).

O MCE exige um esforço computacional limitado quando comparado à análise feita usando o método de onda completa, sendo bastante rápido para prever o comportamento da estrutura (CAMPOS, 2009; VARKANI; FIROUZEH; NEZHAD, 2018). A Figura 8 apresenta o modelo para análise a partir da polarização vertical, com ângulo de incidência φ , tendo as fitas metálicas espessura nula, largura w e periodicidade p . A Figura 8(a) apresenta a posição do vetor campo elétrico em relação às fitas metálicas, enquanto a Figura 8(b) os parâmetros físicos considerados e o ângulo de incidência da onda eletromagnética e a Figura 8(c) apresenta o circuito equivalente associado.

Figura 8 - Modelo para análise para a polarização vertical a partir do formalismo proposto por Marcuvitz: (a) Posição do vetor campo elétrico (b) Parâmetros físicos das fitas e ângulo de incidência da onda eletromagnética (c) Circuito equivalente associado.



Fonte: Autor, 2021.

Na Figura 8, Z_0 é a impedância característica do espaço livre e X_L é reatância indutiva que surge devido à interação da onda com as fitas, tendo seu valor normalizado dado pela Equação 2.

$$\frac{X_L}{Z_0} = F(p, w, \lambda, \varphi) = \frac{p \cos \varphi}{\lambda} \left\{ \ln \left[\operatorname{cosec} \left(\frac{\pi w}{2p} \right) \right] + G(p, w, \lambda, \varphi) \right\} \quad (2)$$

$$G(p, w, \lambda, \varphi) = \frac{0,5(1 - \beta^2)^2 \left[\left(1 - \frac{\beta^2}{4}\right) (C_+ + C_-) + 4\beta^2 C_+ C_- \right]}{\left(1 - \frac{\beta^2}{4}\right) + \beta^2 \left(1 + \frac{\beta^2}{2} - \frac{\beta^4}{8}\right) (C_+ + C_-) + 4\beta^2 C_+ C_-} \quad (3)$$

$$C_{\pm} = \frac{1}{\sqrt{1 \pm \frac{2p \operatorname{sen} \varphi}{\lambda} - \left(\frac{p \cos \varphi}{\lambda}\right)^2}} - 1 \quad (4)$$

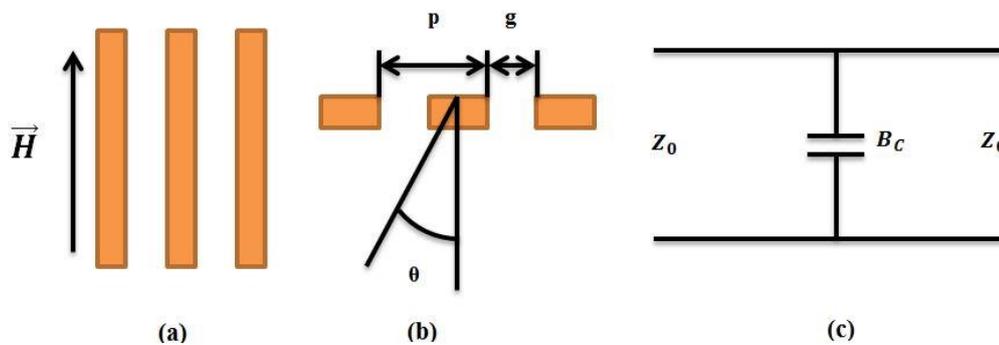
$$\beta = \operatorname{sen}\left(\frac{\pi w}{2p}\right) \quad (5)$$

Sendo λ o comprimento de onda. A Figura 9 apresenta o modelo para a polarização horizontal com ângulo θ , sendo g o espaçamento entre as fitas com periodicidade p . Nota-se que para esta polarização têm-se uma mudança de parâmetro físico considerado, sendo levada em conta a distância entre as fitas, ao invés da espessura das mesmas. A susceptância capacitiva B_C presente no circuito equivalente da Figura 9(c) tem seu valor dado pela Equação 6.

$$\frac{B_C}{Z_0} = 4F(p, g, \lambda, \theta) = \frac{4p \cos \theta}{\lambda} \left\{ \ln \left[\operatorname{cosec}\left(\frac{\pi g}{2p}\right) \right] + G(p, g, \lambda, \theta) \right\} \quad (6)$$

É importante observar que para o cálculo da Equação 6 é preciso fazer a substituição de w por g na Equação 5 e φ por θ na Equação 4.

Figura 9 - Modelo de análise a partir do formalismo de Marcuvitz para polarização horizontal: (a) Posição do vetor campo magnético em relação às fitas (b) Parâmetros físicos considerados (c) Circuito equivalente associado.



Fonte: Autor, 2021.

Os resultados obtidos no conjunto de Equações de 2 a 6 são válidos apenas para ondas planas incidentes nas polarizações vertical e horizontal, não sendo capazes de modelar efeitos de polarização cruzada. Além disso, as mesmas são válidas para um intervalo limitado, dado pela Equação 7 (MARCUVITZ, 1951).

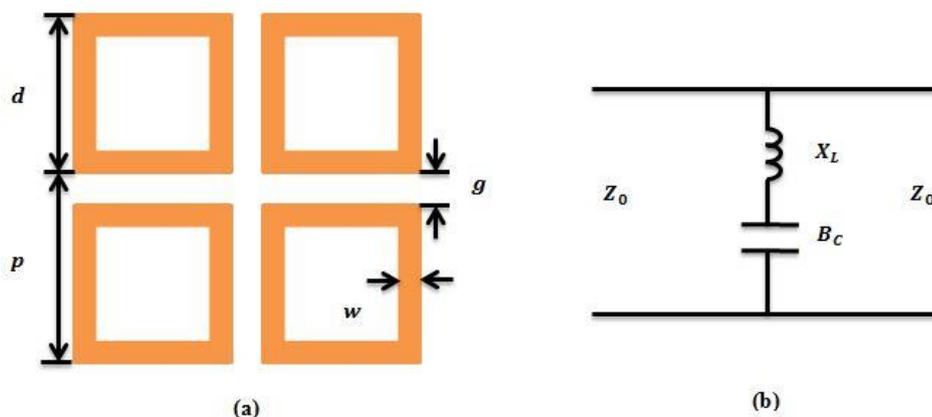
$$\frac{p(1+\sin(\theta \text{ ou } \varphi))}{\lambda} < 1 \quad (7)$$

As vantagens da utilização do formalismo proposto por Marcuvitz é que o mesmo permite a análise de *FSS* com elementos de formas variadas, bastando-se a obtenção do circuito equivalente correspondente. É apresentado a seguir a modelagem matemática e o circuito equivalente para a espira quadrada simples, uma vez que essa estrutura será utilizada neste trabalho.

2.1.4.1 Espira quadrada

O modelo para a espira quadrada apresentada aqui foi proposto por Langley e Parker (1982), com base no formalismo matemático desenvolvido por Marcuvitz. O modelo apresentado na Figura 10 servirá como referência para obtenção das equações que descrevem o comportamento da espira quadrada, sendo apresentado o arranjo e o respectivo circuito equivalente associado.

Figura 10 - *FSS* com elemento do tipo espira quadrada: (a) Parâmetros físicos considerados para análise (b) Circuito equivalente associado.



Fonte: Campos, 2009.

Para o arranjo da Figura 10, a reatância indutiva é dada pela Equação 8.

$$\frac{X_L}{Z_0} = \frac{d}{p} F(p, 2w, \lambda, \varphi) \quad (8)$$

A função F é dada pela Equação 17. A susceptância capacitiva é dada pela Equação 9.

$$\frac{B_C}{Z_0} = 4 \frac{d}{p} F(p, g, \lambda, \theta) \quad (9)$$

A reatância e a susceptância tem o seu valor reduzido por um fator de d/p devido à descontinuidade do condutor (LANGLEY; PARKER, 1982). As Equações 8 e 9 são para uma *FSS freestanding*, sendo que a presença de um dielétrico no qual as estruturas são dispostas provoca um aumento na susceptância, tendo um efeito desprezível na reatância (LANGLEY; PARKER, 1982). Assim, a Equação 9 é corrigida para a Equação 10, sendo ϵ_r é a permissividade relativa do substrato (CAMPOS, 2009).

$$\frac{B_C}{Z_0} = 4\epsilon_r \frac{d}{p} F(p, g, \lambda, \theta) \quad (10)$$

O coeficiente de transmissão e reflexão pode ser escritos em função da reatância indutiva e susceptância capacitiva, conforme Equações 11 e 12, respectivamente.

$$\tau = \frac{1}{X_L - \frac{1}{B_C}} \quad (11)$$

$$\Gamma = 1 - \tau = 1 - \frac{1}{X_L - \frac{1}{B_C}} \quad (12)$$

A partir das equações encontradas nesta seção será feito o dimensionamento da *FSS* proposta, para que ela atue como um filtro rejeita-faixa no intervalo de frequência de interesse.

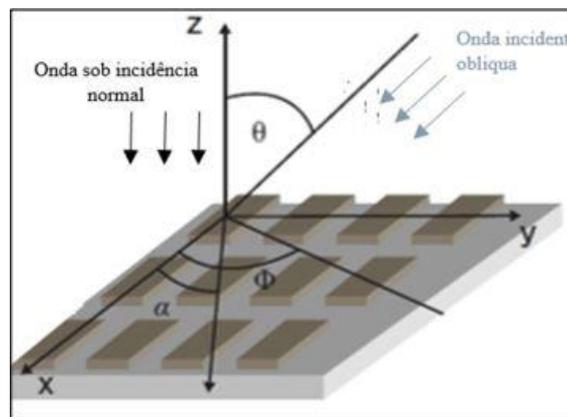
2.1.5 Estabilidade angular de *FSS*

A estabilidade angular de uma *FSS* é o parâmetro que mede a variação da frequência de ressonância da estrutura de acordo com o ângulo de incidência da onda eletromagnética, sendo que, um elemento de qualidade para a aplicação proposta neste trabalho, deve

apresentar pouca ou nenhuma variação para diferentes ângulos (MUNK, 2000; LIU et al., 2017).

A frequência de ressonância da *FSS* pode mudar em função do ângulo de incidência da onda eletromagnética, pois o comprimento efetivo dos elementos da estrutura sofre uma variação, o que influencia nas correntes induzidas em relação à incidência normal (SILVA FILHO, 2018). A Figura 11 apresenta uma onda com incidência normal e outra com incidência oblíqua.

Figura 11 – Incidência normal e oblíqua de uma onda eletromagnética sobre uma *FSS*.



Fonte: Silva Filho, 2018.

A variação da frequência de ressonância depende da polarização da onda eletromagnética incidente (SILVA FILHO, 2018). Para a polarização vertical, a impedância do espaço livre sofre uma mudança para $Z_0 / \cos(\varphi)$ com a variação do ângulo de incidência, enquanto no caso da polarização horizontal, a mudança sofrida pela impedância do espaço livre é de $Z_0 \cos(\theta)$ (LI; LI; LI, 2017).

É possível melhorar a estabilidade angular de uma *FSS*, por meio de aspectos construtivos. O aumento da permissividade relativa do substrato promove uma melhora na estabilidade angular de estruturas compostas por elementos que apresentam essa característica (MUNK, 2000).

Segundo Munk (2000) e Hong et al. (2018) outro parâmetro construtivo que melhora a estabilidade angular, é a diminuição do espaçamento entre os elementos. Uma forma de se efetuar essa diminuição é por meio da miniaturização da *FSS* e/ou uso de uma forma convolucionada, como apresentado por Sivasamy e Kanagasabai (2015). Neste trabalho, a *FSS* proposta foi dimensionada com o menor espaçamento possível entre os elementos.

2.1.6 Aplicações de FSS

As FSS encontram aplicações em várias frequências do espectro eletromagnético, sendo a aplicação mais conhecida a da porta do forno de micro-ondas. Neste caso, a estrutura atua como um filtro passa-faixa, permitindo somente a passagem de ondas eletromagnéticas da frequência da luz visível e bloqueando as demais. A Figura 12 apresenta a aplicação de FSS na porta do forno de micro-ondas.

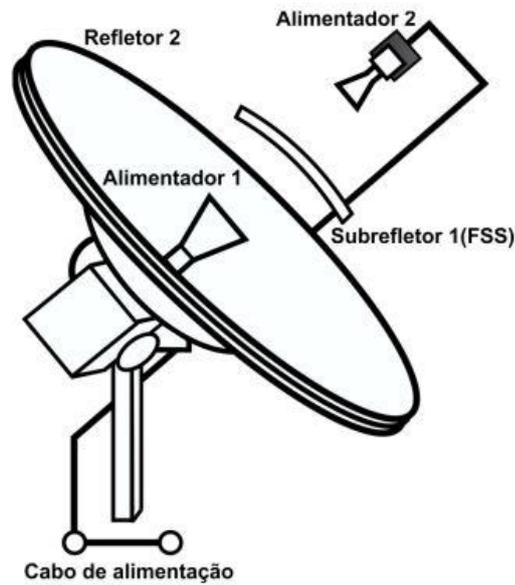
Figura 12 - FSS aplicada na porta do forno de micro-ondas para a filtragem de ondas eletromagnéticas.



Fonte: Silva, A. 2014.

Essas superfícies são aplicadas ainda para melhoria do desempenho de antenas, radomes, mísseis, blindagens eletromagnéticas, filtros angulares e absorvedores de micro-ondas, refletores para comunicação via satélite e segurança em redes sem fio (SILVA, A. 2014). Também podem ser aplicadas no desenvolvimento de sensores, como o apresentado por Soltani et al. (2020). Nas comunicações via satélite, a FSS é utilizada como subrefletor para fazer separação de diferentes bandas de frequência, sendo utilizados dispositivos que operam em mais de uma frequência. A Figura 13 apresenta um exemplo desse tipo de aplicação.

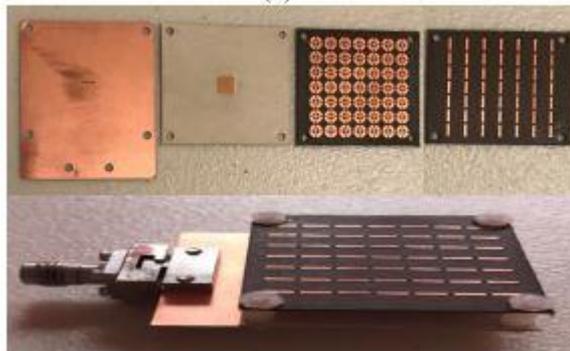
Figura 13 - *FSS* aplicada como subrefletor para comunicação via satélite.



Fonte: Silva, A. 2014.

Para melhoria do desempenho de antenas, *FSS* foram utilizadas por ELZWAWI et al. (2020) para construção de uma antena dipolo com ganho ajustável. O ajuste do ganho é realizado por meio de camadas de *FSS* que funcionam como refletores de canto, modificando a diretividade, e conseqüentemente, o ganho da antena dipolo. Asaadi, Afifi e Sebak (2018) utilizaram uma *FSS* como superstrato para o desenvolvimento de uma antena *patch* com alto ganho e grande largura de banda. A Figura 14 apresenta a antena desenvolvida, sendo possível ver as placas contendo o arranjo de elementos de *FSS*.

Figura 14 - *FSS* aplicada para o desenvolvimento de uma antena *patch* de alto ganho e grande largura de banda.



Fonte: Asaadi, Afifi e Sebak, 2018.

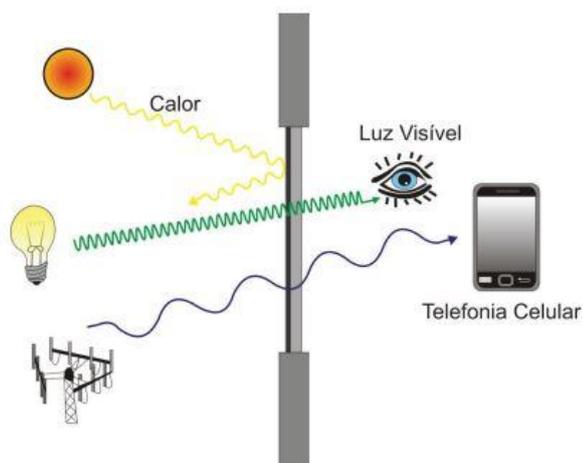
Mais recentemente têm surgido propostas de aplicação para bloqueio de sinal em redes sem fio, para promover uma melhor segurança e qualidade do sinal em ambientes de comunicação *indoor* (XIONG et al., 2015). Neste caso, a *FSS* bloqueia o sinal em

determinada faixa de frequência, impedindo a saída do mesmo, sendo aplicada em superfícies que compõem o papel de parede, janelas e fachadas do ambiente. A *FSS* pode ainda ser aplicada no material que compõe a parede, melhorando a propagação do sinal através da mesma (QASEM; SEAGER, 2009). Neste trabalho, a aplicação será feita sobre uma superfície de vidro, para uso em janelas e fachadas que sejam capazes de impedir a passagem do sinal no intervalo de frequência desejado.

2.1.7 *FSS* aplicadas em vidro

O estudo de aplicação de *FSS* em superfícies de vidro vem recebendo atenção nos últimos anos, para aplicações diversas, inclusive para o desenvolvimento de janelas capazes de realizar o controle da troca de energia entre os ambientes internos e externos (GUSTAFSSON et al., 2006). As mesmas são capazes de impedir a entrada de calor do ambiente exterior para o interior durante o verão e vice-versa no período de inverno, sendo denominadas de janelas de baixa emissividade ou economizadoras de energia (RISSMAN; KENNAN, 2013). Além disso, elas permitem a entrada de sinais de comunicação sem fio, estando apresentado seu funcionamento na Figura 15. Também foram propostas aplicações para realizar o bloqueio de sinais em meios de transporte terrestres, como trens (BURNIER et al., 2017).

Figura 15 - Ilustração de uma janela economizadora de energia. A mesma impede a troca de calor entre os ambientes externo e interno, porém permite a entrada de sinais de comunicação e a luz visível.



Fonte: Segundo, 2014.

Gustafsson et al. (2006) fizeram o estudo da aplicação de uma *FSS* com característica passa-faixa em uma superfície de vidro, com geometria hexagonal, para desenvolvimento de uma janela de economizadora de energia. A mesma permitia a passagem de sinais num

intervalo de frequência de 900 MHz a 2000 MHz, apresentando uma melhora de 10 dB na transmissão destes sinais, em relação ao vidro sem a *FSS* (GUSTAFSSON et al., 2006). A estrutura foi desenhada na superfície de revestimento do vidro, que consistia em uma camada de óxido metálico de condutividade 10^4 S/m, com o auxílio de uma máquina fresadora, estando o resultado obtido apresentado na Figura 16.

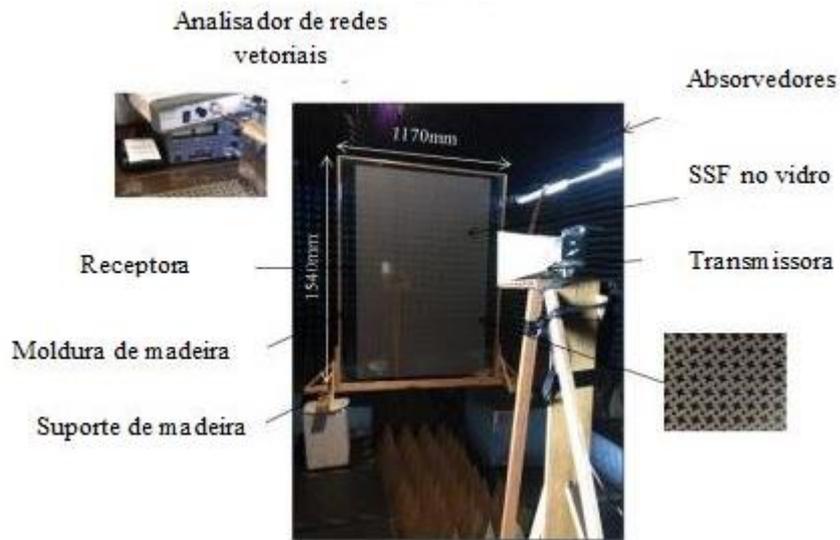
Figura 16 - *FSS* com característica passa-faixa, para permitir a entrada de sinais num intervalo de frequência de 900 MHz a 2000 MHz.



Fonte: Adaptado de Gustafsson et al., 2006.

Dewani et al. (2018) fizeram o estudo de uma *FSS* rejeita-faixa disposta em um vidro comumente utilizado em janelas de construções, para realizar o bloqueio de sinais na frequência de 2 GHz, para a banda *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)*. A *FSS* foi impressa numa camada fina de *Polyethylene Terephthalate (PET)* de espessura 0,038 mm, permissividade relativa 3,4 e tangente de perdas 0,0025, com dimensões 1170x1540 mm, usando-se uma tinta *Silver ink* de condutividade $4,3 \times 10^6$ S/m. A fina camada de *PET* foi disposta num vidro com as mesmas dimensões, espessura de 4 mm com permissividade relativa de 10. Como forma do elemento foi utilizada uma espira quadrada simples, sendo feita uma modificação na mesma para melhoria de desempenho (DEWANI et al., 2018). A Figura 17 apresenta a estrutura final obtida no *setup* para medição, estando em destaque o elemento da *FSS*.

Figura 17 - *FSS* projetada em vidro de janela para bloqueio de sinais *UMTS* de 2 GHz. Em destaque o tipo de elemento utilizado.



Fonte: Dewani et al., 2018.

Mais recentemente Liu et al. (2020) apresentaram uma *FSS* impressa em uma superfície de vidro para bloqueio de sinais na frequência de 2 GHz, integrada com uma antena para *Frequency Modulation (FM)* operando num intervalo de frequência 87,5 MHz a 108 MHz. A mesma foi impressa em um vidro com constante dielétrica 5,8, tangente de perdas 0,001, 4 mm de espessura e dimensões 600x1200 mm, com o uso de uma tinta *Silver ink* de condutividade $6,3 \times 10^7$ S/m. A forma do elemento escolhido para a *FSS* foi o dipolo cruzado, enquanto a antena *FM* possui a forma de um monopolo. A Figura 18 apresentado a estrutura obtida, em uma câmara anecoica para medição (LIU et al., 2020).

Figura 18 - *FSS* impressa em superfície de vidro para bloqueio de sinais na frequência de 2 GHz, com antena *FM* integrada para uma faixa de frequência de 87,5 MHz a 108 MHz. A estrutura encontra-se no interior de uma câmara anecoica para medição.



Fonte: Liu et al., 2020.

Song et al. (2014) apresentaram uma *FSS* com substrato de vidro e construída a partir material condutor transparente, capaz de preservar a visibilidade através da janela. Nas aplicações apresentadas anteriormente o vidro da própria janela serve como substrato para a *FSS*, sendo a Subseção 2.2 dedicada ao entendimento das propriedades físicas e elétricas do vidro.

2.2 Materiais cerâmicos e vítreos

Em ciência dos materiais os mesmos são divididos em classes, tendo-se como classes primárias os metais, polímeros e cerâmicas (CARTER; NORTON, 2007). Ainda segundo Carter e Norton (2007), a divisão é feita com base nos tipos de átomos e como eles estão ligados entre si. Em relação à cerâmica, esta pode ser classificada em grupos como porcelanas, refratárias, produtos de argila estrutural, abrasivas, cimentos, vidros entre outros (KINGERY; BOWEN; UHLMANN, 1976).

Segundo Callister Junior (2000) materiais cerâmicos possuem em sua composição elementos metálicos e não metálicos, com ligações interatômicas completamente iônicas ou predominantemente iônicas, tendo alguma natureza covalente. A palavra cerâmica vem do grego *Keramikos*, cujo significado é matéria-prima queimada, dando indício de que as propriedades desse material são obtidas a partir de um tratamento térmico de alta temperatura denominado de ignição (CALLISTER JUNIOR, 2000). Esses materiais apresentam características como alto ponto de fusão, inércia química e alta resistência ao desgaste, fazendo com que os mesmos apresentem diversas aplicações na engenharia (MARQUES, 2006).

Quando comparadas com os metais e os polímeros, as cerâmicas apresentam propriedades e vantagens atrativas para aplicações específicas, sendo listadas abaixo as principais e mais importantes (MUNZ; FETT, 2001):

- Baixa condutividade elétrica;
- Baixa condutividade térmica;
- Baixa densidade;
- Alta resistência mesmo em altas temperaturas;
- Resistência ao desgaste e corrosão;
- Propriedades ópticas, elétricas e magnéticas específicas.

Sobre as ligações interatômicas, iônica e covalente, muitas cerâmicas apresentam ambos os tipos em sua composição, sendo a eletronegatividade dos átomos importante para determinar o nível de caráter iônico da estrutura (CALLISTER JUNIOR, 2000). A Tabela 2 apresenta o percentual de caráter iônico para algumas cerâmicas comuns.

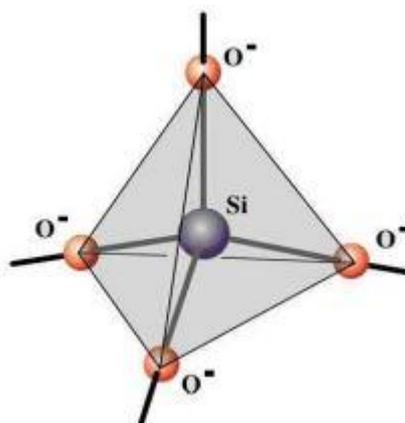
Tabela 2 - Percentual de caráter iônico para algumas cerâmicas comuns.

Material cerâmico	Percentual iônico
CaF ₂	89
MgO	73
NaCl	67
Al ₂ O ₃	63
SiO ₂	51
Si ₃ N ₄	30
ZnS	18
SiC	12

Fonte: Adaptado de Callister Junior, 2000.

Entre os tipos de cerâmicas, existem aquelas que possuem como material básico o silicato, que é composto principalmente por silício e oxigênio (CALLISTER JUNIOR, 2000). Esses dois últimos são os elementos mais abundantes da superfície da Terra em escala atômica, constituindo a maior parte dos solos, rochas, argilas e areias (KLEIN; DUTROW, 2012). A estrutura cristalina dos silicatos é representada por um arranjo de tetraedro composto por SiO₄⁴⁻, conforme a Figura 19 (MARTINS, 2015).

Figura 19 - Estrutura cristalina do silicato representada por um tetraedro de SiO₄⁴⁻.



Fonte: Seara da Ciência, 2014.

Segundo Callister Junior (2000), o material mais simples formado a partir do silicato é o dióxido de silício, sendo mais conhecido por sílica (SiO_2). Quando os tetraedros que formam a sílica são arranjados de forma regular, obtêm-se uma estrutura cristalina, como o quartzo, enquanto um arranjo com elevado grau de aleatoriedade, produz um material amorfo, não-cristalino, denominado de sílica fundida (VIGIL et al., 1994). A sílica fundida é também denominada de sílica vítrea e quando a mesma é misturada com outros óxidos como o NaO_2 e CaO , forma o vidro comum usado em janelas, recipientes, pratos entre outros objetos (BARAZANI, 2011).

2.2.1 Vidro

O vidro é um material que está muito presente no dia a dia da sociedade moderna de diferentes formas, tamanhos e cores. Sua história remonta a da própria cerâmica, tendo sido encontradas peças de joalheria e pequenas embarcações de vidro nas escavações de múmias do antigo Egito, datadas cerca de 3.000 a.c. (CARTER; NORTON, 2007). O vidro é uma substância fisicamente homogênea, que é obtida a partir do resfriamento de uma massa inorgânica em fusão, que apresenta a característica de se solidificar através de um aumento contínuo de viscosidade (BABISK, 2009). Pode-se dizer que as principais características desse material são transparência ótica e facilidade de fabricação (CALLISTER JUNIOR, 2000).

Os vidros são constituídos por silicatos não cristalinos adicionados de outros óxidos como CaO , Na_2O , K_2O e Al_2O_3 , que influenciam em suas propriedades (CALLISTER JUNIOR, 2000). Tais propriedades que são fortemente influenciadas são viscosidade, expansão térmica e condutividade (BANSAL; DOREMUS, 2013). A Tabela 3 apresenta a composição de alguns vidros comerciais comuns.

Tabela 3 - Composição de alguns vidros comerciais comuns.

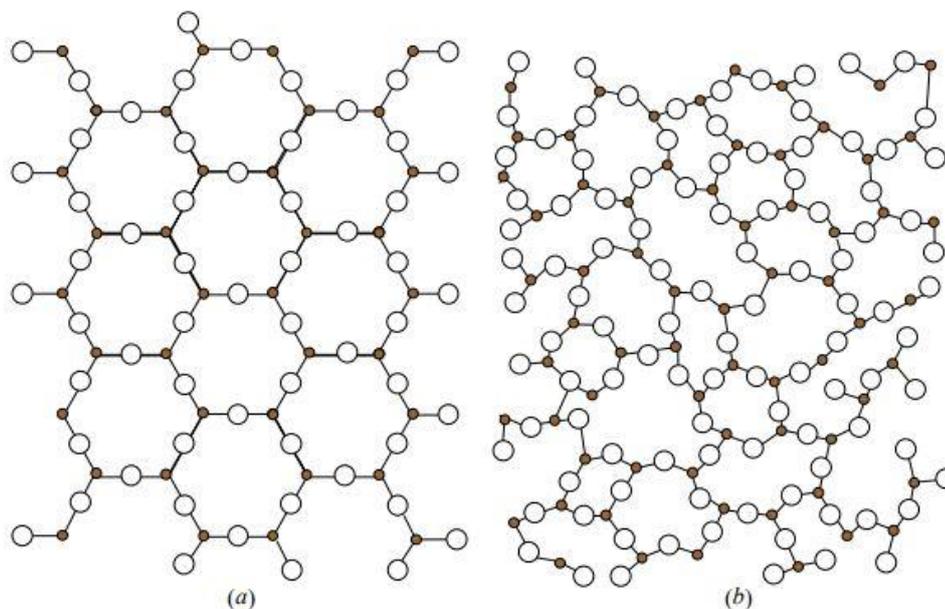
Tipo de vidro	Composição (%)						Características
	SiO ₂	Na ₂ O	CaO	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	Outros	
Sílica fundida	>99,5						Elevada temperatura de fusão, coeficiente de expansão muito baixo (Resistente ao choque)
96% Sílica (Vycor [®])	96				4		Resistente a choques térmicos e ataques químicos – usado em vidrarias de laboratório
Borossilicato (Pyrex [™])	81	3,5		2,5	13		Resistente a choques térmicos e ataques químicos – usado em vidrarias para fornos
Recipientes (Cal de soda)	74	16	5	1		4MgO	Baixa temperatura de fusão, facilmente trabalhável e durável
Fibra de vidro	55		16	15	10	4MgO	Facilmente estirado na forma de compósitos fibra – vidro-resina
Sílex ótico	54	1				37PbO, 8K ₂ O	Alta densidade e alto índice de refração – lentes óticas
Vitrocerâmica (Piroceram)	43,5	14		30	5,5	6,5TiO ₂ , 0,5As ₂ O ₃	Facilmente fabricados, resistentes, resistente a choques térmicos

Fonte: Adaptado de Callister Junior, 2000.

No vidro, as estruturas tetraédricas da sílica são ligadas entre si pelos seus cantos, formando uma rede tridimensional, apresentando ordem somente para pequenas distâncias, sendo que, para distâncias consideráveis, o vidro é um material amorfo (BANSAL;

DOREMUS, 2013). A Figura 20(a) apresenta um arranjo hipotético de um cristal de Al_2O_3 comparado com sua forma vítrea, apresentado na Figura 20(b), onde nota-se a aleatoriedade do arranjo vítreo (NASCIMENTO, 2000).

Figura 20 - Arranjo hipotético de uma estrutura composta por Al_2O_3 : (a) Forma cristalina (b) Forma vítrea.



Fonte: Nascimento, 2000.

A partir da Figura 20(b) nota-se que o vidro apresenta um alto grau de aleatoriedade. Na forma cristalina, o tetraedro não pode ser compartilhado apenas pelos cantos, mas também pelas bordas e/ou faces, enquanto na forma vítrea, o tetraedro pode ser compartilhado apenas pelos cantos (CARTER; NORTON, 2007).

Com base em sua composição química, o vidro pode ser dividido nas seguintes famílias (AKERMAN, 2000):

- Vidros de sílica fundida ou cristais de quartzo;
- Vidros de borossilicato;
- Vidros ao chumbo;
- Vidros de alumino-borossilicato;
- Vidros silicatos alcalinos;
- Vidros sodo-cálcicos.

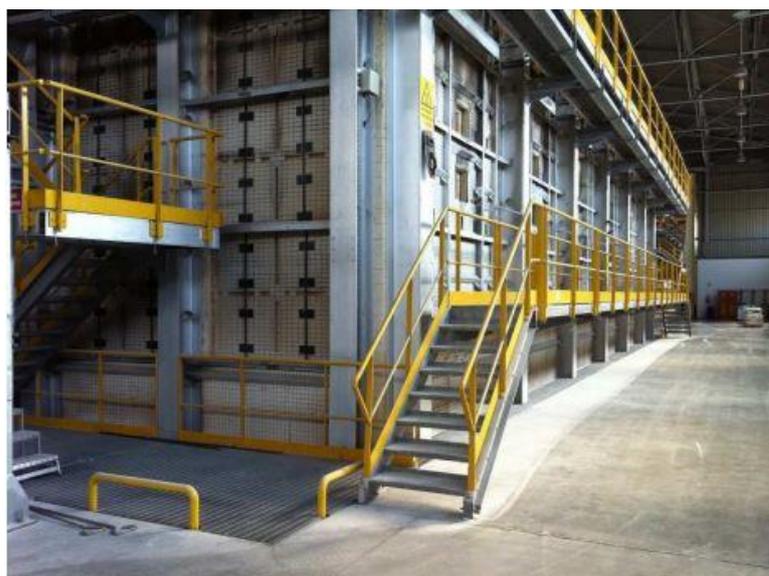
Das famílias apresentadas anteriormente, o vidros sodo-cálcicos são mais utilizados, pois são usados na fabricação de garrafas, frascos, potes, bulbo de lâmpadas e janelas

(BABISK, 2009). A Subseção 2.2.2 trata sobre o vidro sodo-cálcico utilizado na construção civil para fechamento de fachadas e janelas de edificações.

2.2.2 Vidros aplicados em janelas e fachadas de prédios

O vidro tem sido amplamente utilizado para a construção de edificações, compondo fachadas, janelas, móveis, divisórias, espelhos entre outras formas de uso. Nessas aplicações utiliza-se o vidro plano ou *float*, sendo este último nome atribuído devido ao seu processo de fabricação, que consiste na flutuação na massa de vidro em um banho de estanho derretido (ROSA; COSENZA; BARROSO, 2007). Os componentes são misturados em proporções adequadas e fundidos em temperaturas que podem chegar a 1.600 °C, sendo esse um valor reduzido devido à presença do carbonato de sódio, denominado de barrilha (MONTANO; BASTOS, 2013). A Figura 21 apresenta a parte externa de um forno utilizado para a fabricação de vidro plano (CONTE, 2011).

Figura 21 - Parte externa de um forno utilizado para a fabricação do vidro plano ou *float*.



Fonte: Conte, 2011.

A Figura 22 apresenta o vidro plano na sua parte final de fabricação (CEBRACE, 2015).

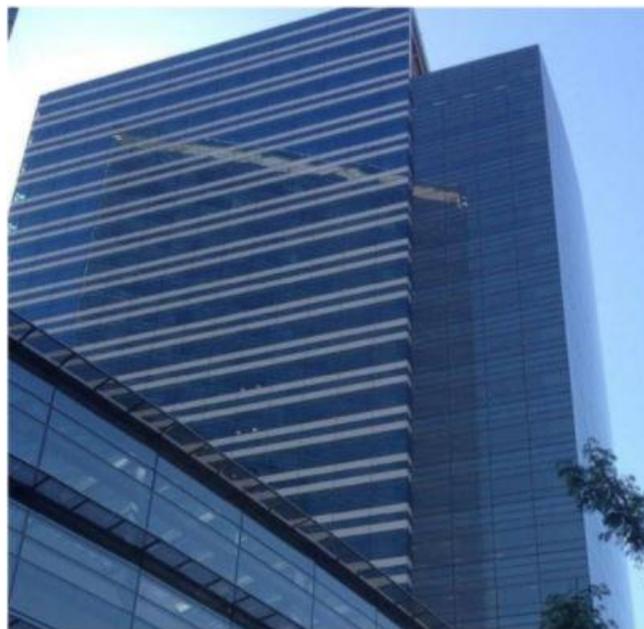
Figura 22 – Vidro plano na parte final de fabricação após a saída do forno.



Fonte: Cebrace, 2015.

A aplicação de vidro em edificações tem suas diretrizes estabelecidas pela ABNT NBR 7199, atualizada em 2016, onde é possível encontrar especificações para utilização nas mais diferentes formas (WESTPHAL, 2016). A Figura 23 apresenta a utilização de vidro para compor o fechamento de uma edificação.

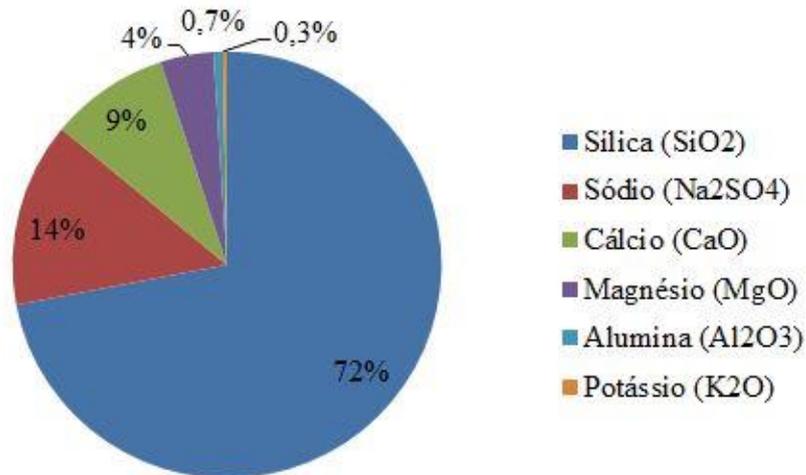
Figura 23 - Utilização de vidro para fechamento de uma edificação.



Fonte: Westphal, 2016.

O vidro plano comercial é tipicamente sodo-cálcico, tendo uma composição majoritária de sílica, soda e cal e com adições de óxido de magnésio e alumina, havendo também a presença de outros óxidos, porém em quantidades muito pequenas (SANTOS, 2009). A Figura 24 apresenta a porcentagem dos componentes mencionados anteriormente presentes no vidro plano ou *float* comercial (CEBRACE, 2015).

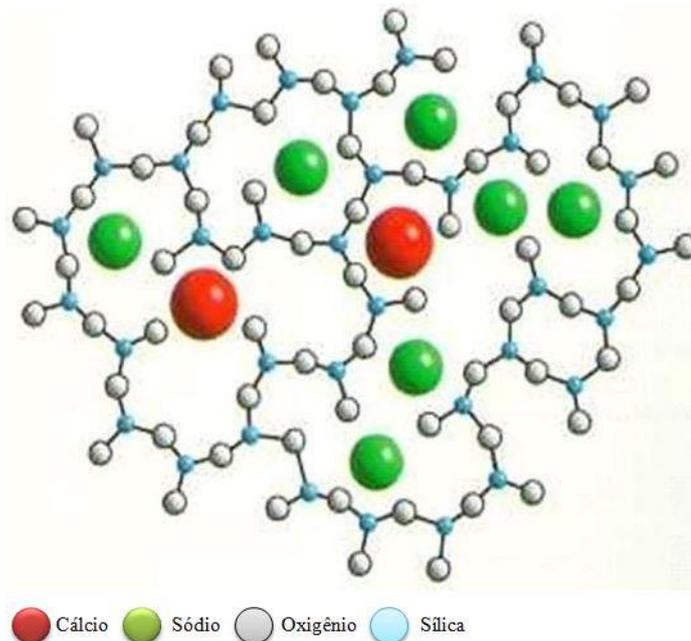
Figura 24 - Concentração dos componentes que compõem o vidro plano ou *float*.



Fonte: Adaptado de Cebpace, 2015.

A Figura 25 apresenta a estrutura atômica do vidro sodo-cálcico, contendo os seus componentes principais (BABISK, 2009).

Figura 25 - Estrutura atômica do vidro sodo-cálcico, contendo os seus principais componentes.



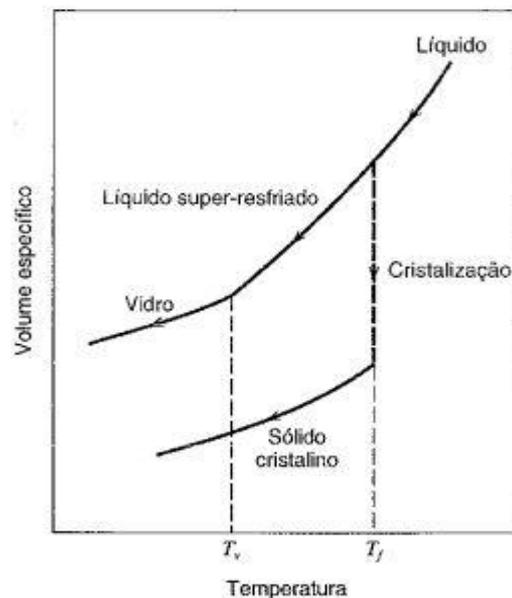
Fonte: Adaptado de Babisk, 2009.

Os vidros são caracterizados por propriedades bem definidas que são comuns a todos eles independente da composição e também por propriedades que os diferem em relação aos líquidos e sólidos cristalinos (SAMPAIO, 2001).

2.2.3 Propriedades térmicas do vidro

Segundo Callister Junior (2000) uma das características que distinguem os materiais cristalinos e não cristalinos, está na dependência do volume específico, inverso da densidade, em relação à temperatura. Para um vidro composto de sílica pura, têm-se um valor de densidade de $2,20 \text{ g/cm}^3$, equivalente a um volume específico de 0,45 (BANSAL; DOREMOS, 2013). A Figura 26 apresenta a dependência do volume específico com a temperatura para um material cristalino e outro não cristalino. Antes de atingir a temperatura de transição vítrea T_v , a sílica vítrea encontra-se no estado de um líquido super-resfriado, sendo esse um estado transitório antes da formação do vidro. O material cristalino se solidifica na temperatura de fusão T_f , enquanto que o não cristalino tem como característica a temperatura de transição vítrea T_v (CALLISTER JUNIOR, 2000).

Figura 26 - Comparação da dependência do volume específico com a temperatura para materiais cristalinos e não cristalinos.



Fonte: Callister Junior, 2000.

Normalmente os materiais vítreos apresentam um baixo coeficiente de expansão térmica (CARTER; NORTON, 2007). Na Tabela 4 estão apresentados os valores para o coeficiente de expansão térmica para os vidros de sílica, num intervalo de temperatura de -50 a $1000 \text{ }^\circ\text{C}$

(BANSAL; DOREMUS, 2013). Pode-se notar ao aumento crescente do coeficiente de dilatação térmica com a temperatura, porém tendo-se uma diminuição a partir dos 600 °C.

Tabela 4 - Coeficiente de expansão térmica para diferentes valores de temperatura para o vidro de sílica.

Temperatura (°C)	Coeficiente de expansão térmica
-50	0,25
0	0,38
25	0,41
50	0,43
100	0,48
200	0,53
300	0,56
400	0,57
500	0,57
600	0,56
800	0,54
1000	0,54

Fonte: Adaptado de Bansal e Doremus, 2013.

A dilatação térmica do vidro depende de sua composição química, sendo que para os sodo-cálcicos com espessura de 4 a 5 mm, pode-se ter uma variação de temperatura de 60 °C, sem que haja dano ao mesmo (AKERMAN, 2000). Ainda segundo Akerman (2000), diferenças de temperatura mais altas geram tensões internas além do limite suportável, fazendo com que o vidro venha a quebrar.

Outra característica do vidro é que o mesmo apresenta uma baixa condutividade térmica (AKERMAN, 2000; CARTER; NORTON, 2007). A Tabela 5 apresenta os valores da condutividade térmica para os vidros a base de sílica, num intervalo de temperatura de -173 a 300 °C. Para temperaturas acima de 300 °C, os efeitos da radiação começam a ser significativos e produzem resultados imprecisos (BANSAL; DOREMUS, 2013).

Tabela 5 - Condutividade térmica do vidro constituído de sílica para um intervalo de temperatura de -173 °C a 300 °C.

Temperatura (°C)	Condutividade térmica (Wm⁻¹K⁻¹)
-173	0,67
-150	0,84
-100	1,05
0	1,32
25	1,37
50	1,41
100	1,48
200	1,59
300	1,71

Fonte: Adaptado de Bansal e Doremus, 2013.

Além de suas propriedades térmicas, o vidro também possui propriedades mecânicas particulares, sendo a Subseção 2.2.4 dedicada ao conhecimento das mesmas.

2.2.4 Propriedades mecânicas do vidro

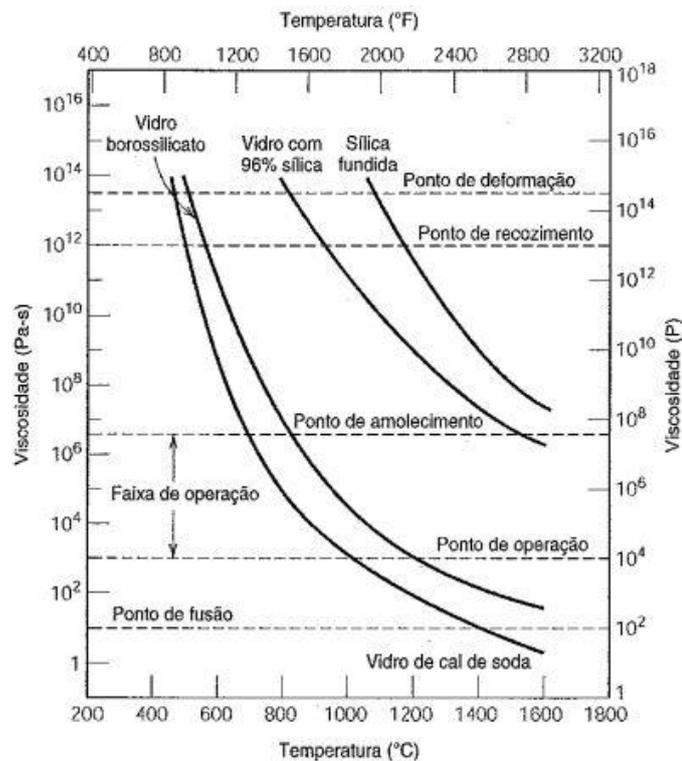
Segundo Callister Junior (2000) os materiais vítreos apresentam um processo diferente de solidificação, quando comparado com os materiais cristalinos, pois, mediante o resfriamento com diminuição da temperatura, um vidro se torna continuamente mais viscoso e não há uma temperatura específica na qual o líquido se transforma em um sólido. Akerman (2000) destaca a viscosidade como a propriedade mais importante, tomando-se como ponto de vista a tecnologia utilizada para elaboração e conformação do vidro. Callister Junior (2000) define os seguintes pontos importantes no processo de fabricação do vidro, com base em sua escala de viscosidade dada em $1 \text{ Pa}\cdot\text{s} = 1 \text{ N/m}^2\cdot\text{s}$.

- Ponto de fusão: Temperatura na qual a viscosidade é de $10 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, sendo o vidro fluído o suficiente para ser considerado um líquido;
- Ponto de operação: Nesta temperatura a viscosidade é de $10^3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, podendo o vidro ser deformado com facilidade;
- Ponto de amolecimento: Temperatura cuja viscosidade é de $4 \times 10^6 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, sendo a máxima temperatura na qual o vidro pode ser manuseado sem sofrer alterações dimensionais;

- Ponto de recozimento: Nesta temperatura a viscosidade é de 10^{12} Pa-s, sendo as difusões atômicas suficientemente rápidas, de modo que tensões residuais podem ser removidas em intervalos de 15 minutos, aproximadamente;
- Ponto de deformação: Temperatura para qual a viscosidade atinge o valor de 3×10^{13} Pa-s, sendo que em temperaturas abaixo desse ponto o rompimento ocorre antes da deformação plástica.

A Figura 27 apresenta as regiões mencionadas anteriormente para alguns vidros comuns.

Figura 27 - Viscosidade como função da temperatura para alguns tipos comuns de vidro.



Fonte: Shand 1968 apud Callister Junior, 2000.

Apesar de ser um material frágil, o vidro não possui uma baixa resistência mecânica (BABISK, 2009). Na sua região elástica o vidro tem um comportamento semelhante ao do aço, pois se o mesmo for submetido a uma tensão, quando está cessa, o vidro retorna ao seu tamanho original (AKERMAN, 2000). A Tabela 6 apresenta a constante de elasticidade de Young para o vidro a base de sílica, em diferentes valores de temperatura (BANSAL; DOREMUS, 2013). Nota-se que o aumento da temperatura faz com que o vidro apresente uma maior deformação, sendo esse resultado esperado, pois o aquecimento faz com que o mesmo se aproxime do seu estado líquido.

Tabela 6 - Módulo da constante elástica de Young para o vidro a base de sílica em diferentes temperaturas.

Temperatura (°C)	Módulo de Young (GPa)
25	72,9
100	74,0
200	75,1
400	77,2
600	78,7
800	80,0
1000	81,1

Fonte: Bansal e Doremus, 2013.

Uma vez abordadas às propriedades térmicas e mecânicas do vidro, a Subseção 2.2.5 trata das características eletromagnéticas do mesmo.

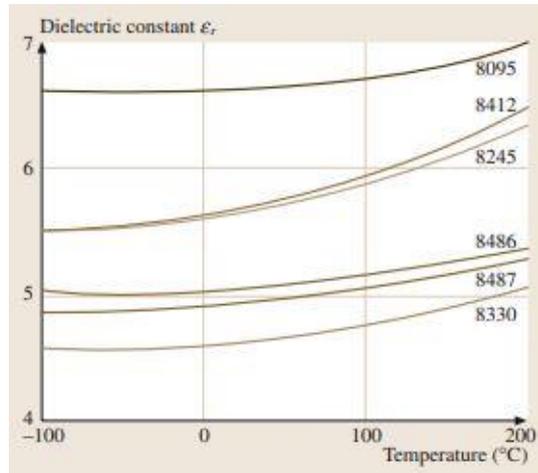
2.2.5 Características eletromagnéticas do vidro

A maioria dos tipos de vidro, incluindo os utilizados em janelas, possui uma permissividade relativa entre 4,5 e 8,0 (MARTIESSEN; WARLIMONT, 2005), sendo apresentado um valor entre 4 e 10 em Notaros (2011). Valores mais altos são obtidos para o vidro contendo chumbo, $\epsilon_r = 9,5$, e $\epsilon_r \approx 20$ para vidros com grande concentração de chumbo (MARTIESSEN; WARLIMONT, 2005). De forma contrária, Kaur et al. (2016) verificou que a adição de MoO_3 e B_2O_3 em vidros de telurite e boroterulite de molibdênio, respectivamente, provoca uma diminuição da permissividade. Vale lembrar que a permissividade relativa é um número complexo composto pela parte real denominada constante dielétrica (ϵ') e a imaginária, denominada de constante de perdas (ϵ'') (GHODGAONKAR, VARADAN, VARADAN; 1990).

A dependência dos valores da permissividade com a frequência e com a temperatura é relativamente pequena, uma vez que, para um intervalo de frequência de 50 Hz a 10^9 Hz o valor não varia mais do que 10% (MARTIESSEN; WARLIMONT, 2005). A Figura 28 apresenta a variação dos valores da constante dielétrica com a temperatura para alguns tipos comuns de vidro, medidos a uma frequência de 1 MHz. Os mesmos são diferenciados por um código número, sendo importante observar o rotulado com 8487, uma vez que este representa um vidro com concentração de sílica de 75%, valor próximo aos que serão utilizados neste

trabalho. Pode-se notar que o valor da constante dielétrica aumenta juntamente com a temperatura.

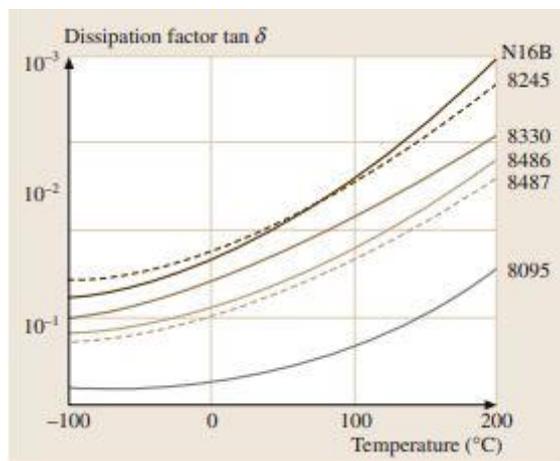
Figura 28 - Variação da permissividade relativa com a temperatura para alguns tipos comuns de vidro.



Fonte: Martiessen e Warlimont, 2005.

Segundo Martiessen e Warlimont (2005) o fator de dissipação dielétrica, denominado tangente de perdas ($\tan\delta$), é dependente da frequência e da temperatura, sendo que diversos mecanismos causam perdas dielétricas no vidro, tendo as mesmas, valores mínimos no intervalo de frequência 10^6 Hz a 10^8 Hz. Vidros com cerca de 70% de sílica em sua composição, apresentam valores baixos para a tangente de perdas, tendo-se um aumento significativo apenas a uma frequência de 5,5 GHz, chegando a 10^{-3} (MARTIESSEN; WARLIMONT, 2005). Conforme apresenta a Figura 29, o aumento da temperatura provoca o decremento da tangente de perdas. Novamente um destaque deve ser dado ao vidro com código 8487. As curvas foram obtidas em uma frequência de 1 MHz.

Figura 29 - Efeitos do aumento da temperatura na tangente de perdas do vidro comercial.



Fonte: Martiessen e Warlimont, 2005.

Em temperatura ambiente o vidro é conhecido e tem sido usado, comumente, como um material eletricamente isolante (NASCIMENTO, 2000; ESCANHOELA JR, 2011). De fato, o vidro comercial apresenta um valor bem baixo em sua condutividade elétrica, sendo de $\sigma \approx 10^{-12}$ S/m em temperatura ambiente (NOTAROS, 2011). Entretanto, a partir da elevação da temperatura e adição de componentes específicos na composição do vidro, pode-se fazer com que o mesmo apresente características condutoras para aplicações específicas (BELIN, 2000; XU et al., 2006). O valor da condutividade pode também ser diminuído através da adição de Bi_2O_3 , como verificado por Rani et al. (2014).

Como visto anteriormente, a temperatura exerce certa influência nas propriedades eletromagnéticas do vidro. Na Subseção 2.2.5.1 é apresentado os efeitos que o tratamento térmico, por meio da elevação da temperatura, tem sobre o vidro, sendo dada ênfase para a permissividade relativa, visto que este parâmetro influencia diretamente na estabilidade angular de uma *FSS* sobre um substrato (MUNK, 2000).

2.2.5.1 Efeito do tratamento térmico nas propriedades eletromagnéticas do vidro

O tratamento térmico em superfícies de vidro é aplicado para modificação da estrutura em seu nível molecular, modificando-se algumas de suas propriedades (CALLISTER JUNIOR, 2000). A partir do processo de tratamento térmico pode-se obter um maior nível de cristalização do vidro, sendo que o tempo e a temperatura de tratamento são variados, sendo entre 200 °C e 1000 °C para a temperatura (ZHANG et al., 2014). O tratamento térmico pode ser feito por meio de fornos específicos, como o forno elétrico apresentado na Figura 30 (CARTER; NORTON, 2007).

Figura 30 - Pequeno forno elétrico usado para tratamento térmico em amostras.



Fonte: Autor, 2021.

Em seu trabalho Morsi e Basha (2011) fizeram uma análise dos efeitos do tratamento térmico em amostras de vidro com alta quantidade de sílica, aproximadamente 65%, e com adição de titânio. A Tabela 7 apresenta as condições do tratamento térmico aplicado nas amostras de vidro.

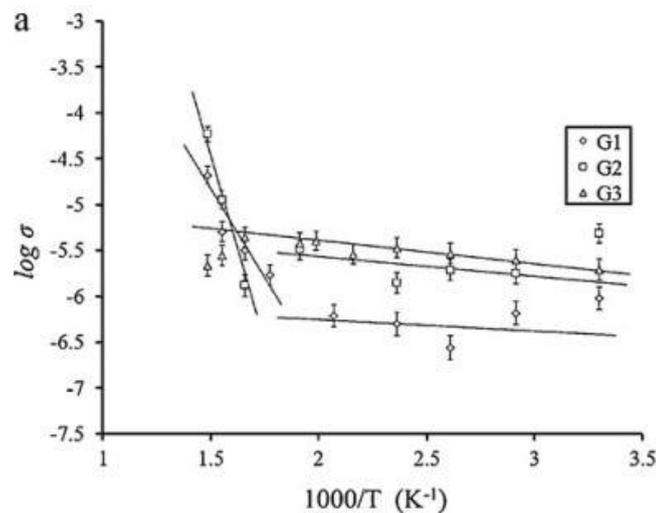
Tabela 7 - Código das amostras de vidro com aditivos de TiO_2 e condições do tratamento térmico aplicado.

Código da amostra	Condições do tratamento térmico	Aditivos (para 100 g de vidro)	Observações
G1	Sem tratamento	4g TiO_2	Vidro transparente
G2	714 °C por 1 hora	4g TiO_2	Branco opaco + fase vítrea
G3	714 °C por 1 hora + 964 °C por 1 hora	4g TiO_2	Branco opaco + fase vítrea

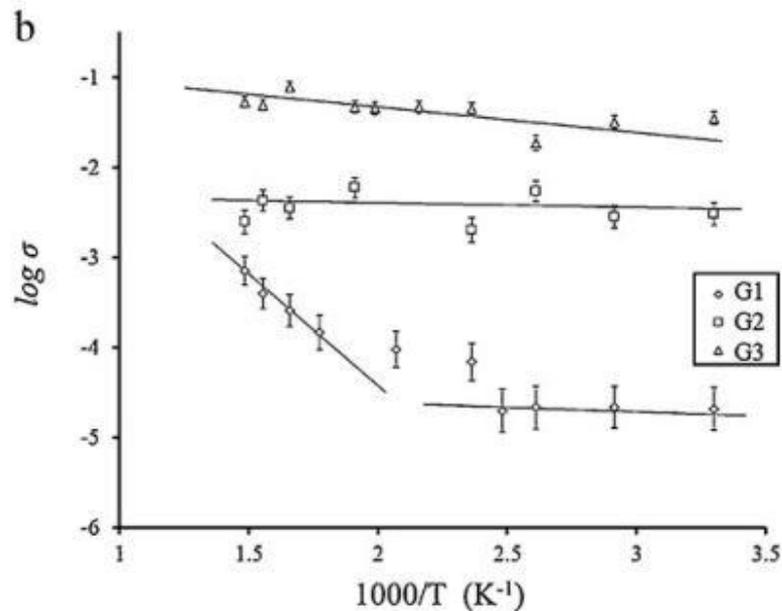
Fonte: Adaptado de Morsi e Basha, 2011.

Foram analisados os efeitos para constante dielétrica e condutividade, sendo apresentado nas Figuras 31 (a) e (b) os resultados obtidos para uma frequência de 1 kHz e 1 MHz, respectivamente, para a condutividade (MORSI; BASHA, 2011). Pode-se notar que o tratamento térmico provocou um aumento na condutividade, mesmo está sendo medida em diferentes temperaturas.

Figura 31 - Efeito do tratamento térmico em amostras de vidro com grande quantidade de sílica e adição de titânio: (a) Medições realizadas em uma frequência de 1 kHz (b) Medições realizadas em uma frequência de 1 MHz.



(a)



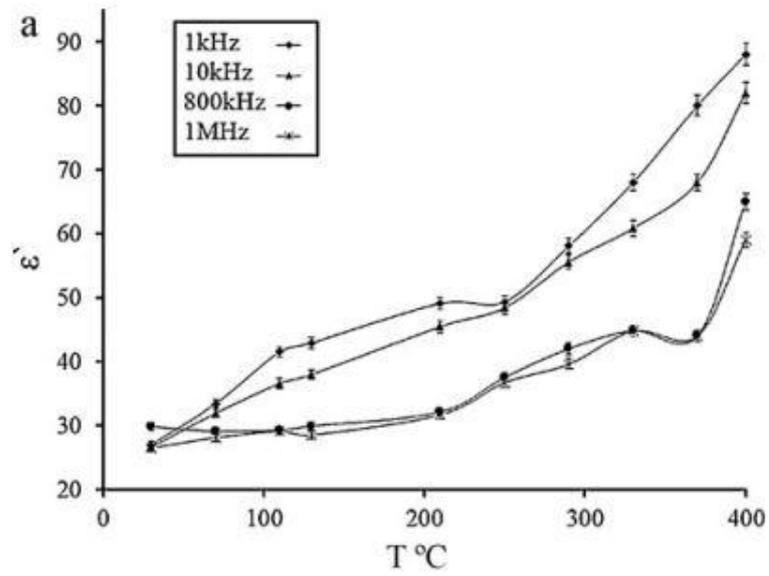
(b)

Fonte: Morsi e Basha, 2011.

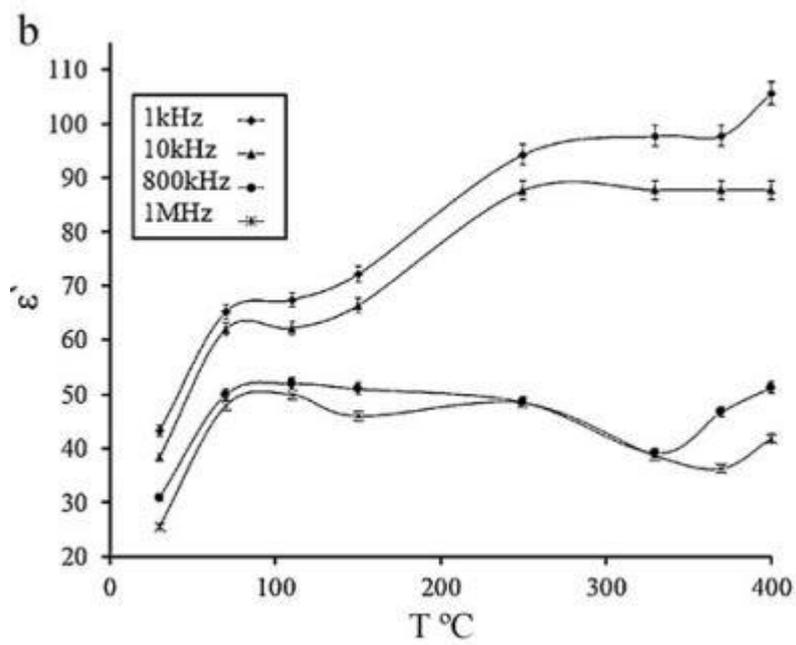
Resultados semelhantes foram obtidos para a constante dielétrica, estando na Figura 32(a) os resultados para a amostra G1 medidos em diferentes frequências, a Figura 32(b) contém os resultados de G2 e a Figura 32(c) os resultados de G3 (MORSI; BASHA, 2011). Nota-se que o tratamento térmico provoca um aumento na constante dielétrica, sendo muito notável para o caso na amostra G3, pois a mesma apresenta um valor acima de 180, apesar do aumento da frequência. O aumento da constante dielétrica com a temperatura pode estar relacionado com o enfraquecimento da força de ligação entre as moléculas e átomos, fazendo com que as mesmas vibrem cada vez mais, aumentando o nível de polarização (GOSWAMI et al., 2010).

Como visto na Subseção 2.1.5 o aumento da permissividade relativa do substrato melhora a estabilidade angular da FSS composta que elementos com esta característica, logo foi feito um tratamento térmico nas superfícies de vidro utilizadas como substrato para a estrutura proposta neste trabalho, para observar seus efeitos na estabilidade angular. As amostras G2 e G3 apresentaram um pouco de opacidade após o tratamento, devida ao tempo e a temperatura elevada (MORSI; BASHA, 2011). Neste trabalho, esse feito será evitado, pois é necessário preservar a transparência do vidro. Para isso é preciso ter um controle de temperatura, pois, como observado por Redkov et al. (2019), o vidro com uma concentração de sílica de 72% apresenta um processo de cristalização, tornando-se opaco, em temperaturas próximas de 780 °C.

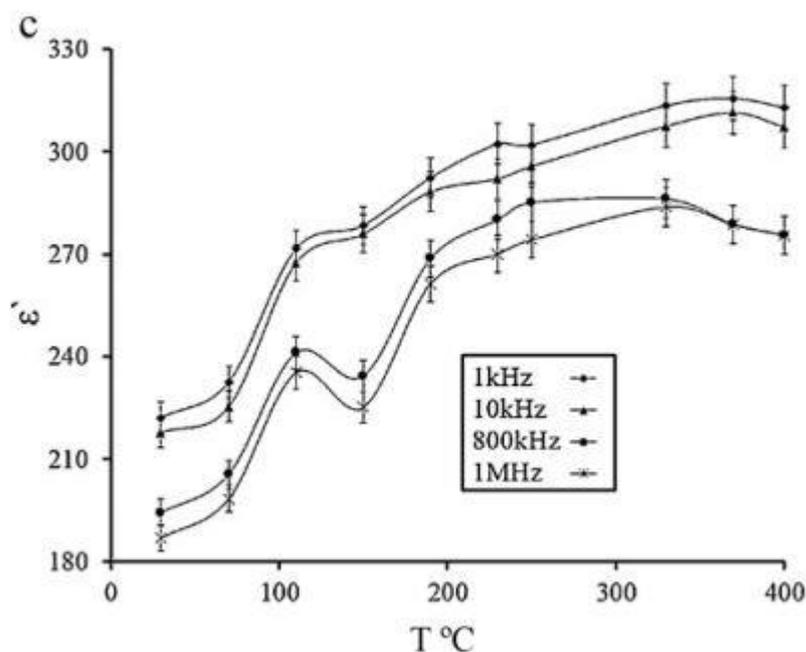
Figura 32 - Comportamento da constante dielétrica das amostras de vidro com a variação da temperatura medida em diferentes frequências: (a) Amostra G1 (b) Amostra G2 e (c) Amostra G3.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Morsi e Basha, 2011.

Com base nos efeitos provocados nas propriedades eletromagnéticas do vidro vistos anteriormente, foi feito um tratamento térmico em amostras de vidro utilizadas como substrato para a estrutura proposta neste trabalho, e analisados os seus efeitos nas propriedades eletromagnéticas.

2.3 Comunicação em ambientes *indoor*

Grande parte da comunicação em ambientes *indoor*, no interior de residências e prédios, na atualidade é feita por meio das redes de comunicação sem fio (*wireless*), uma vez que a mesma elimina a necessidade de cabos entre o transmissor e o receptor, oferecendo comodidade e flexibilidade aos usuários (ALMEIDA FILHO, 2014). Nesta tecnologia de comunicação a informação é transmitida por meio do espaço livre, entre uma antena transmissora e receptora. Tem sido um desafio para técnicos, engenheiros e pesquisadores da área de telecomunicações desenvolverem e melhorarem equipamentos para darem suporte aos avanços das redes de comunicação sem fio (OLIVEIRA, 2008).

Na comunicação sem fio em ambientes *indoor* é observado uma grande variação da energia eletromagnética, devido as constantes modificações do ambiente (SEYBOLD, 2005). De fato, a modelagem da propagação nestes ambientes é consideravelmente diferente da comunicação *outdoor*, comunicação em ambientes exteriores, apresentando-se complicada muitas vezes. A modelagem da comunicação *indoor* é bastante difícil devido a grande

variabilidade dos ambientes e materiais empregados para construção, bem como a movimentação de pessoas e objetos, ou ainda, a simples ação de abrir portas e janelas (SEYBOLD, 2005). Muitas vezes não existe uma linha de visão direta entre o transmissor e o receptor e a comunicação acontece devido a inúmeras interações entre a onda eletromagnética e o meio, como reflexão, difração, refração e dispersão (RIBEIRO, 2012).

A comunicação *indoor* apresenta os mesmos mecanismos que a *outdoor*, sendo que a principal diferença é que nesta primeira, as condições mudam muito rapidamente. Onde as antenas são montadas também exercem impacto, em larga escala, na propagação da onda eletromagnética (RAPPAPORT, 2002). Como a onda eletromagnética sofre várias reflexões no ambiente *indoor*, pode-se concluir que a mesma incide nas janelas do ambiente em diversas direções e posições para os vetores campo elétrico e magnético. Logo, estabilidade angular é fundamental para a *FSS* proposta neste trabalho, para que a mesma possa apresentar um funcionamento satisfatório nas diversas situações de incidência.

Como a comunicação sem fio é amplamente utilizada em ambientes *indoor*, a Subseção 2.3.1 aborda alguns conceitos sobre esta tecnologia.

2.3.1 Tecnologia de comunicação sem fio

Atualmente a tecnologia de comunicação sem fio divide-se em uma variedade de serviços, operando em faixas de frequências específicas, tais como *Wireless Local Area Network (WLAN)*, *Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX)*, *Long Term Evolution (LTE)* que corresponde à tecnologia 4G, *Wireless Wide Area Network (WWAN)*, *LoRa*, entre outras (FERREIRA; MOLANO ORTIZ; COSTA, 2019). Esses serviços têm como princípio básico a presença de uma antena transmissora e uma receptora, comunicando-se por meio do espaço livre. A Figura 33 apresenta o exemplo de um sistema de comunicação entre duas antenas no espaço livre. Vale destacar que, para os sistemas *wireless*, a antena é um de muitos componentes de importância crítica (BALANIS, 2005).

Os dispositivos sem fio tornaram-se tão populares nos últimos anos que, atualmente, estão presentes em quase todas as atividades humanas. Esses dispositivos sofisticados são suportados pelas tecnologias mencionadas anteriormente, sendo que o grande desafio da atualidade consiste em dotar tais dispositivos com características de mobilidade que atendam velocidades de deslocamento de usuários cada vez maiores (ROCHOL, 2018).

Figura 33 - Sistema de comunicação através do espaço livre com o uso de antenas.



Fonte: Fiorio, 2014.

Uma rede de comunicação sem fio é definida em termos de padrões e especificações que são desenvolvidos por diferentes organizações de padronização ou associações de indústrias, havendo padrões e especificações para diferentes tecnologias (YACOUB, 2017). Nos ambientes de comunicação *indoor* a tecnologia *WLAN* é bastante utilizada para a conexão de dispositivos com a internet. A Subseção 2.3.2 trata sobre as especificações técnicas dessa tecnologia, uma vez que a *FSS* proposta será desenvolvida para operar na frequência da mesma.

2.3.2 Padrões *IEEE* para redes *WLAN*

As redes locais sem fio para interconexão de computadores e celulares com a internet, tem cobertura em uma área pouco maior do que uma centena de metros. Segundo Rochol (2018) esse tipo de rede pode se organizar a partir de uma base central de controle ou de forma espontânea, isto é, sem base central de controle. Neste último caso a rede é denominada de *ad hoc* ou simplesmente *MANET* (*Mobile Ad hoc Network*) (ROCHOL, 2018). Um padrão *WLAN* muito utilizado é o *IEEE 802.11*, cuja topologia está apresentada na Figura 34. O mesmo tem como princípio de funcionamento um ponto de acesso conectado a rede fixa, sendo os demais dispositivos conectados via *wireless*.

Figura 34 - Topologia para *WLAN* segundo o padrão *IEEE 802.11*.

Fonte: Morais, 2011.

Atualmente, as redes *WLAN* de comunicação sem fio têm sido um segmento com crescimento expressivo no ramo das telecomunicações. Sendo bastante utilizadas em escritórios e áreas abertas de empresas, residências, áreas públicas, hotéis e muito outros lugares. As mesmas não apresentam um grande alcance, ficando entre 50 m e 250 m, tem uma taxa de comunicação de dados entre 1 Mbps e 248 Mbps e estão sujeitas a interferências de outras redes de comunicação sem fio que operam na mesma frequência (NAPOLITANO, 2019). A Tabela 8 apresenta um resumo dos padrões *IEEE* para as redes *WLAN*, mais comumente utilizados, com suas respectivas frequências de operação, largura de banda, alcance e característica principal.

Tabela 8 - Padrões *IEEE* para as redes *WLAN*.

Padrão	Frequência [GHz]	Largura de banda [Mbps]	Alcance [m]	Principal característica
802.11a	5	54	50	Altas taxas de comunicação
802.11b	2,4	11	100	Amplamente utilizado
802.11g	2,4	54	100	Compatível com 802.11b
802.11n	2,4/5,0	248	250	Altas taxas de comunicação e maior alcance

Fonte: Adaptado de *IEEE*, 2016.

A grande parte dos produtos que aderem à família dos padrões 802.11 são certificados pela *Wi-Fi*. Os padrões mais utilizados, dentro do 802.11, são os 802.11b e 802.11g, sendo que este último é um sucessor do primeiro, tendo como diferença a capacidade de transmissão

de dados. Ambos utilizam a mesma banda, operando na frequência que compreende o intervalo de 2,4000 GHz a 2,4835 GHz. Já o padrão 802.11n foi aprovado em setembro de 2009, possuindo uma taxa de dados maior que os demais e operando em duas frequências distintas (NAPOLITANO, 2019). Uma alternativa que tem crescido muito nos últimos anos é a utilização dos padrões IEEE 802.11 a/n/ac, que utiliza a faixa de frequência de 5 GHz (TI, 2020).

A *FSS* proposta neste trabalho opera no intervalo de frequência 2,4000 GHz – 2,4835 GHz, compreendendo os padrões 802.11 que operam com essa frequência.

2.4 Técnicas de medição

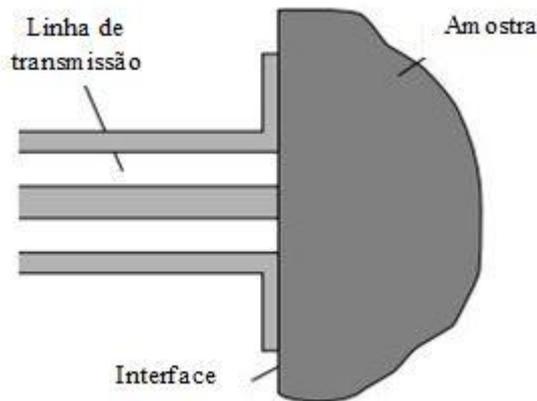
Como já apresentado na Subseção 2.1.3 há muitas técnicas propostas para uma análise teórica de uma *FSS*, objetivando-se a obtenção dos coeficientes de transmissão e reflexão, em função da frequência da onda incidente. Métodos mais complexos utilizam a técnica de espalhamento espectral, apresentando resultados bastante precisos para resposta em frequência da estrutura (MITTRA; CHAN; CWIK, 1988). As técnicas de análise experimental também objetivam a obtenção dos coeficientes de transmissão e reflexão da *FSS* como função da frequência, permitindo uma caracterização do funcionamento da estrutura. Usualmente a análise é feita para a obtenção de dados nas polarizações vertical e horizontal, a partir da mudança de polarização das antenas usadas. Os métodos utilizados são baseados na transmissão e reflexão da onda incidente. A seguir serão apresentados alguns métodos de medição de amostras, que podem ser utilizados para análise experimental da *FSS* proposta e obtenção dos parâmetros eletromagnéticos dos substratos de vidro utilizados.

2.4.1 Método de reflexão da linha coaxial

No uso de um método de reflexão as propriedades da amostra são obtidas a partir da reflexão da onda incidente, devido à descontinuidade da impedância causada pela presença do material em análise (MOSIG et al., 1981). As características são obtidas a partir do coeficiente de reflexão medido em um plano de referência, tomando-se usualmente o plano da interface da amostra (STUCHLY; STUCHLY, 1980). Esse é um método não ressonante, sendo possível a utilização das duas formas de reflexão da teoria das linhas de transmissão, curto-circuito e circuito aberto (CHEN et al., 2004). Com base nestas duas formas de reflexão, pode-se ter uma variedade de configurações para utilização do método de reflexão da linha coaxial. No entanto, para os mesmos obtêm-se um circuito equivalente, do qual são derivadas

equações, que são função do coeficiente de reflexão da onda incidente e a partir da resolução das mesmas, obtêm-se as características eletromagnéticas da amostra (MOSIG et al., 1981). A Figura 35 apresenta uma configuração geral para o uso do método de reflexão da linha coaxial, sendo possível identificar que a amostra é posicionada no fim da linha de transmissão.

Figura 35 - Configuração geral para utilização do método de reflexão usando-se uma linha de transmissão.



Fonte: Adaptado de Chen et al., 2004.

Segundo Stuchly e Stuchly (1980) essa técnica permite a análise de tipos variados de amostras, como biológicas, ou até mesmo líquidas, como apresentado em Shibata e Kobayashi (2015). Uma vez que este método permite encontrar parâmetros eletromagnéticos de amostras, o mesmo pode ser utilizado para análise dos substratos de vidro usados neste trabalho.

2.4.2 Método de reflexão no espaço livre

A utilização deste método é indicada quando a amostra apresenta um tamanho comparável ao comprimento de onda, não sendo conveniente a aplicação do método da linha de transmissão coaxial (GHODGAONKAR; VARADAN; VARADAN, 1989). O mesmo é utilizado por meio do uso de antenas e um analisador de redes vetoriais, cuja sigla em inglês é VNA (UMARI et al., 1991). Para que este método apresente uma precisão aceitável, algumas condições precisam ser rigorosamente respeitadas. Em relação às dimensões, a amostra necessita ter um tamanho de, pelo menos, duas vezes o comprimento de onda para que os resultados sejam precisos o suficiente (CHEN et al., 2004). Outro fator que tem influência direta nos resultados é o ambiente de medição, uma vez que a amostra está exposta as interferências provenientes do mesmo. Como este método faz o uso de antenas, a amostra

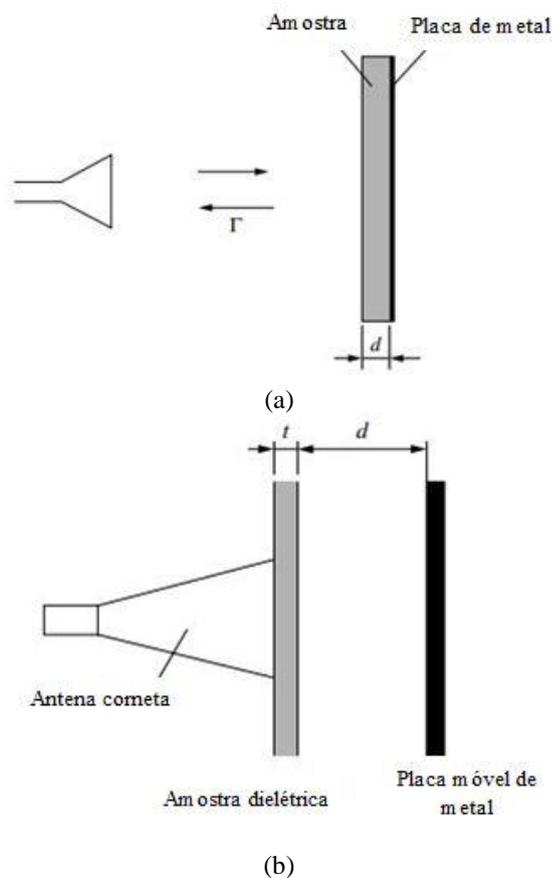
deve estar afastada o suficiente para que a condição de campo distante seja satisfeita (CHEN et al., 2004). A Equação 13 apresenta a condição de campo distante mencionada.

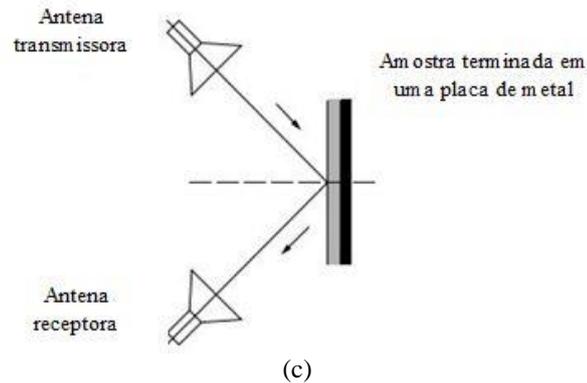
$$d > \frac{2D^2}{\lambda} \quad (13)$$

Onde λ é o comprimento de onda e D é a maior dimensão da abertura da antena transmissora. Para uma antena circular D é o diâmetro, enquanto, para uma antena retangular, toma-se a sua diagonal.

Uma das vantagens do método é a facilidade que o mesmo apresenta para variação de incidência da onda eletromagnética, no plano da amostra, bastando para isso uma rotação da mesma. Há três configurações básicas para utilização do método de reflexão no espaço livre que são: Reflexão de curto-circuito, suporte de metal móvel e o de reflexão bi estático (CHEN et al., 2004). A Figura 36 apresenta um exemplo dessas configurações.

Figura 36 - Configurações básicas para utilização do método de reflexão no espaço livre: (a) Método de reflexão de curto-circuito (b) Método do suporte de metal móvel (c) Método de reflexão bi estático.





Fonte: Adaptado de Chen et al., 2004.

Na Figura 36(a) está apresentado o método de reflexão de curto-circuito, onde a amostra é colocada em uma placa de metal e posicionada a uma distância que satisfaça a condição de campo distante da antena transmissora. Neste caso é medido o coeficiente de reflexão entre a antena e a amostra, estando às medições sujeitas as interferências do ambiente de medição (CHEN et al., 2004).

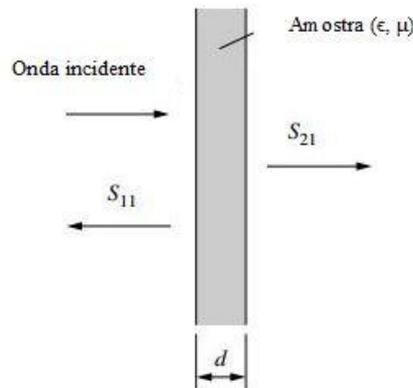
Já a Figura 36(b) apresenta o *setup* para o método de reflexão com suporte móvel, que também consiste em uma placa de metal. Essa técnica foi proposta por Kalachev et al. (1990), com objetivo de medir a permissividade complexa de polímeros. A amostra é colocada diretamente na abertura da antena e a placa é movida até uma distância d em que ocorra ressonância (CHEN et al., 2004). A vantagem dessa configuração é que o uso da câmara anecoica pode ser dispensado, além de não exigir que o tamanho da amostra seja relativamente grande (KALACHEV et al., 1990). A amostra é semitransparente para a onda eletromagnética incidente, logo, parte da energia atravessa a mesma e parte é refletida de volta. Uma vez que a amostra é fixada diretamente na abertura da antena, a condição de campo distante não é satisfeita e deve ser levada em consideração para a obtenção dos resultados.

A Figura 36(c) apresenta o método de reflexão bi-estático que, diferente dos outros, faz a utilização de duas antenas de abertura. Esse *setup* de medição exige um processo de calibração um pouco diferente dos demais, sendo este processo apresentado em Umari et al. (1991). Neste caso, o coeficiente de reflexão obtido depende da polarização da onda incidente e também é preciso considerar o ângulo no qual ocorre à incidência.

2.4.3 Método de transmissão/reflexão no espaço livre

Esse método é bastante utilizado para medição da resposta em frequência de *FSS*, fazendo-se uso de um segurador e antenas cornetas de ganho padrão. O mesmo consiste em posicionar a amostra entre as duas antenas, respeitando a condição de campo distante (BOUGHRIET; LEGRAND; CHAPOTON, 1997). A análise é feita a partir dos coeficientes de transmissão e reflexão da onda que incide sobre a amostra com base nos parâmetros S_{11} e S_{21} da matriz de espalhamento espectral (GHODGAONKAR; VARADAN; VARADAN, 1989). A Figura 37 apresenta o modelo que será usado como base para a obtenção das equações, que derivam da transmissão e reflexão da onda.

Figura 37 - Modelo para análise de incidência de uma onda eletromagnética em amostra no espaço livre.



Fonte: Adaptado de Chen et al., 2004.

A análise considera que a amostra tem um tamanho suficientemente grande, de modo que o efeito das bordas pode ser desprezado. Aplicando as condições de fronteira, os parâmetros S_{11} e S_{21} são dados pelas Equações 14 e 15, respectivamente (GHODGAONKAR; VARADAN; VARADAN, 1990).

$$S_{11} = \frac{\Gamma(1 - \tau^2)}{1 - \Gamma^2\tau^2} \quad (14)$$

$$S_{21} = \frac{\tau(1 - \Gamma^2)}{1 - \Gamma^2\tau^2} \quad (15)$$

Onde Γ e τ são os coeficientes de reflexão e transmissão, sendo dados pelas Equações 16 e 17, respectivamente.

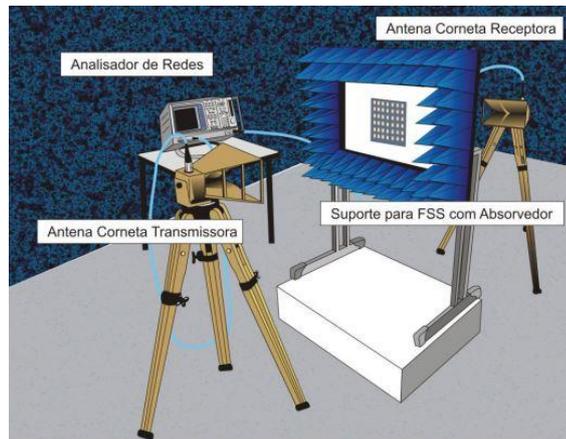
$$\Gamma = \frac{\sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} - 1}{\sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} + 1} \quad (16)$$

$$\tau = e^{-\frac{j2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\mu_r \epsilon_r} d} \quad (17)$$

Sendo μ_r e ϵ_r a permeabilidade e a permissividade da amostra, respectivamente e λ_0 é o comprimento de onda no espaço livre.

Como mencionado anteriormente, à caracterização da resposta em frequência de uma *FSS* é feita, normalmente, por meio do uso do método de transmissão e reflexão no espaço livre. Através da mudança da polarização das antenas de vertical para horizontal, é possível medir as características de transmissão das polarizações vertical e horizontal da *FSS* (CAMPOS, 2009). Um fator que provoca a obtenção de dados errados nas medições é a presença de difrações nas bordas do material em análise, podendo esse problema ser resolvido com a utilização de absorvedores ao redor da *FSS*, como apresentado na Figura 38.

Figura 38 - *Setup* para medição da resposta em frequência de uma *FSS* usando-se o método transmissão e reflexão no espaço livre. Neste caso foi feito o uso de absorvedores para diminuir o efeito de difração nas bordas.

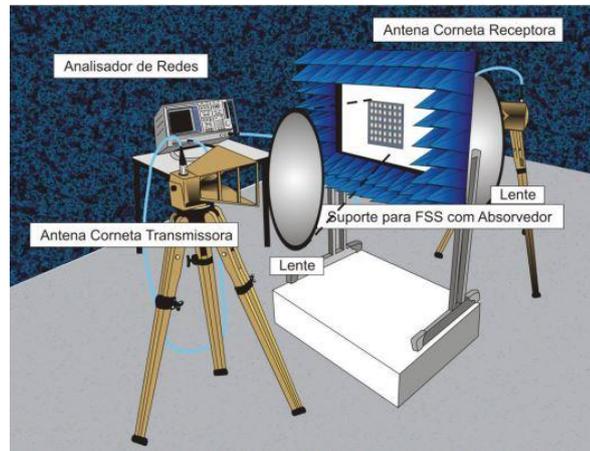


Fonte: Segundo, 2014.

Para aumentar ainda mais a precisão das medições, é possível fazer o uso de um par de lentes, cuja finalidade é concentrar a onda eletromagnética apenas na região que está à amostra (SHAKER; CHAHARMIR; LEGAY, 2008). O uso das lentes diminui de forma significativa as difrações nas bordas, aumentando a precisão das medições, além de

possibilitar uma diminuição no tamanho da amostra (GHODGAONKAR; VARADAN; VARADAN, 1989). A Figura 39 apresenta um *setup* de medição onde foi feito o uso de lentes.

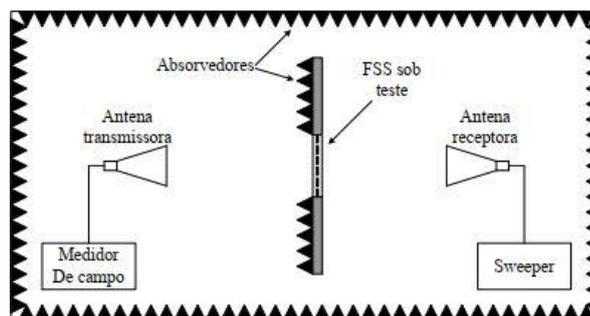
Figura 39 - *Setup* para medição de *FSS* com o uso de lentes para concentrar a onda eletromagnética no espaço onde está a amostra. O uso das lentes aumenta de forma significativa à precisão dos resultados obtidos.



Fonte: Segundo, 2014.

Outra forma de melhorar a precisão das medições é fazer o uso da câmara anecoica, para eliminar as reflexões da onda eletromagnética nas paredes e no solo. Isso permite que as antenas mantenham uma distância relativamente maior entre si, garantido que as ondas que incidem na amostra sejam planas (CHEN et al., 2004). Neste caso pode-se usar, como instrumentos de medição, um medidor de campo e um gerador de varredura, sendo apresentado na Figura 40 um exemplo desse tipo de medição (MCSPADDEN; YOO; CHANG, 1992).

Figura 40 - *Setup* para medição da resposta em frequência de uma *FSS* dentro de uma câmara anecoica.

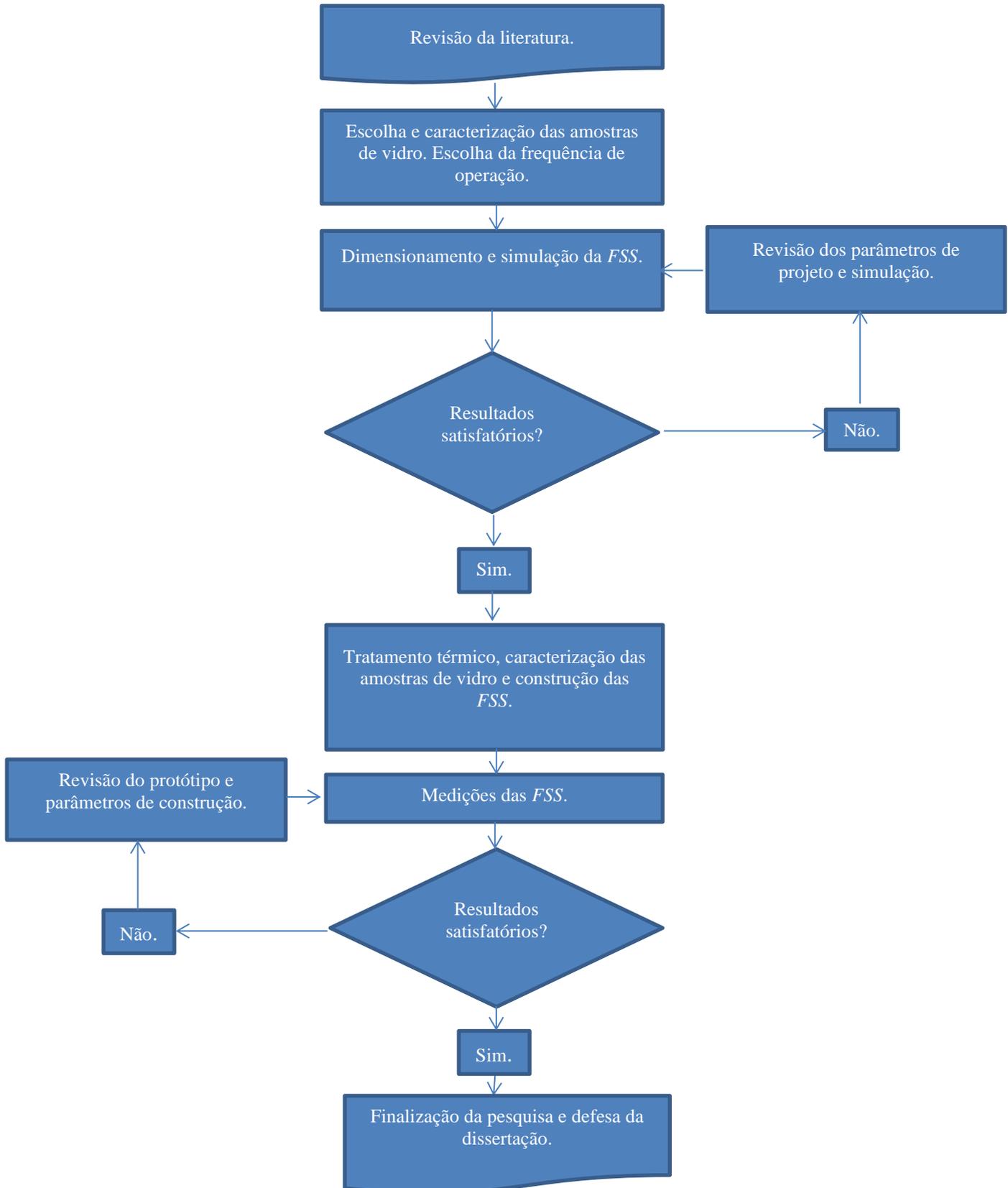


Fonte: Silva, M. 2014.

Nesta seção foram apresentados os conceitos básicos dos métodos que serão utilizados na medição das amostras e protótipos propostos neste trabalho. Na Seção 3 são apresentados os materiais e os métodos utilizados para a obtenção dos resultados da pesquisa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados os materiais e métodos empregados para o desenvolvimento do trabalho proposto. Abaixo é apresentado um fluxograma com as etapas seguidas para a execução da pesquisa.



3.1 Determinação da frequência de operação

A *FSS* proposta funciona como um filtro espacial para sinais no intervalo de frequência de 2,4000 GHz - 2,4835 GHz, seguindo os padrões *IEEE* 802.11b/g conforme a Tabela 8. Esses padrões foram escolhidos, pois os mesmos são amplamente utilizados em redes *WLAN* para comunicação em ambientes *indoor*.

3.2 Determinação do tipo de elemento utilizado

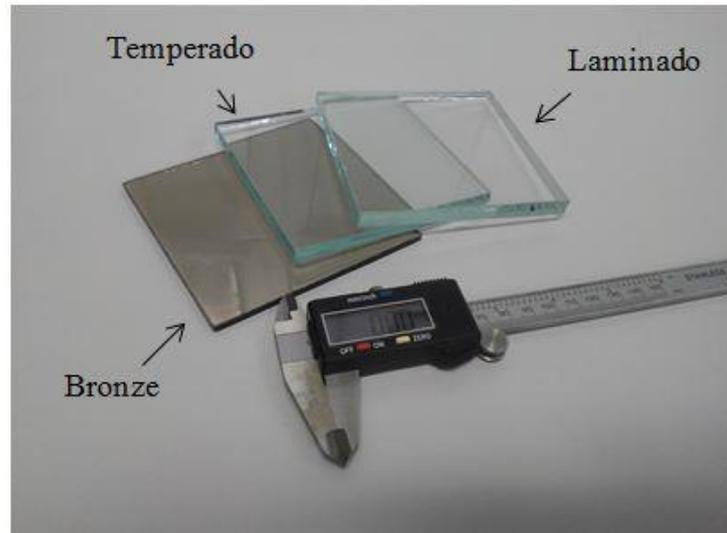
Definida a frequência de operação e a largura de banda a ser atendida, a etapa seguinte foi à determinação da forma do elemento da *FSS*. O elemento escolhido foi à espira quadrada simples, pois a mesma apresenta um bom desempenho de estabilidade angular e largura de banda relativamente larga, conforme a Tabela 1. Logo, esse tipo de elemento atende bem aos requisitos para a aplicação proposta.

3.3 Especificações das amostras de vidro

É necessário o conhecimento dos parâmetros eletromagnéticos do vidro utilizado como substrato, tais como permissividade relativa e tangente de perdas. Esses parâmetros são essenciais para determinação das dimensões da *FSS*, fazendo com que a mesma opere na frequência desejada. O conhecimento da espessura do vidro também é necessário. Esses valores foram obtidos por medição direta em amostras de vidro comumente utilizados em janelas e fachadas de prédios.

Para a escolha do tipo de vidro utilizado, foi consultada a Kristall® vidraçaria especializada em vidros para janelas e fachadas. Com base nas informações fornecidas foram escolhidas amostras de três tipos de vidro denominados vidro bronze, temperado e laminado. Os tipos bronze e temperado são utilizados em janelas e o laminado em fachadas. A Figura 41 apresenta as amostras dos tipos de vidro escolhidos, juntamente com o paquímetro utilizado para medir as dimensões das mesmas. A amostra do vidro temperado não passou pelo processo de têmpera comercial, que normalmente é realizado para aplicação em janelas. Assim, o nome foi utilizado apenas para identificação da mesma.

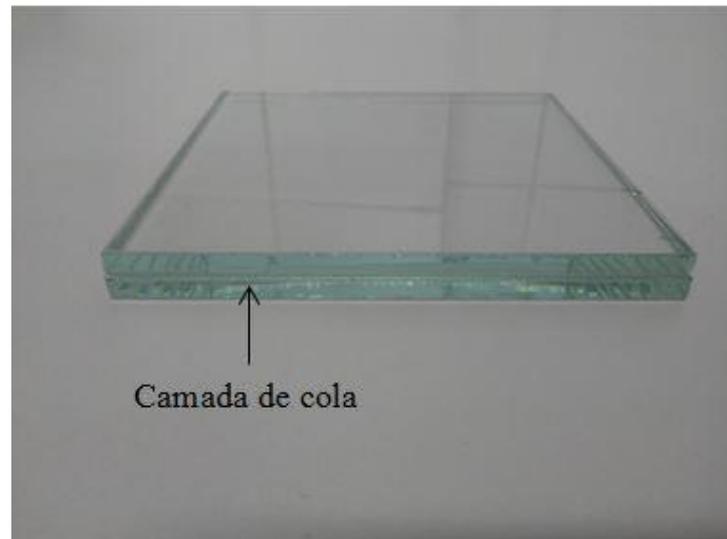
Figura 41 - Amostras dos tipos de vidro escolhidos.



Fonte: Autor, 2021

A amostra de vidro laminado é formada por duas lâminas de vidro com 4 mm de espessura cada, unidas por uma cola apropriada. A Figura 42 apresenta o vidro laminado, sendo possível visualizar as lâminas e a camada de cola.

Figura 42 - Detalhe das camadas do vidro laminado.



Fonte: Autor, 2021.

A Tabela 9 apresenta as dimensões das amostras de vidro.

Tabela 9 – Dimensões das amostras de vidro.

Tipo de amostra	Comp. [mm] x Larg. [mm]	Espessura [mm]
Temperado	100x100	6,14
Laminado	100x100	8,75
Bronze	100x100	3,89

Fonte: Autor, 2021.

As características eletromagnéticas das amostras foram mensuradas usando-se o método de reflexão, a partir de uma sonda coaxial eficiente ao mensurar amostras com espessura de 0,1 mm a 10 mm, conforme especificado no manual *Dielectric Assessment Kit (DAK)* de 2018. Foi utilizado um *Vectorial Network Analyzer (VNA)* da R&S® ZND 100 kHz-8,5 GHz, com precisão de quatro casas decimais, no intervalo de frequência de 1,0 GHz a 4,0 GHz. Os parâmetros medidos foram constantes dielétrica (ϵ'), de perdas (ϵ''), condutividade (σ) e tangente de perdas ($\tan\delta$), sendo realizadas cinco medições em diferentes locais das amostras e tomado o seu valor médio. Esse método de medição foi utilizado para caracterizar as amostras antes e após o processo de tratamento térmico, sendo apresentado na Figura 43 o *setup* utilizado para a medição.

Figura 43 - *Setup* utilizado para caracterização das amostras.



Fonte: Autor, 2021.

Realizada a caracterização das amostras de vidro antes do processo térmico, o passo seguinte consistiu no tratamento térmico das mesmas, para verificar o seu efeito nos parâmetros eletromagnéticos mensurados.

3.4 Tratamento térmico das amostras

Para realização do tratamento térmico, as amostras foram cortadas nas dimensões de 50 mm x 50 mm. Isso foi feito para que uma quantidade maior fosse colocada dentro do forno, tornando mais eficiente o processo de tratamento. A Figura 44 apresenta as amostras cortadas antes de serem tratadas termicamente.

Figura 44 - Amostras de vidro antes do tratamento térmico.



Fonte: Autor, 2021.

O tratamento térmico foi realizado em pequenos fornos elétricos no Laboratório de Telecomunicações e Ciência e Engenharia de Materiais (LOCEM) da Universidade Federal do Ceará (UFC), com controle de temperatura e tempo, sendo apresentado um dos fornos utilizados na Figura 45.

Figura 45 – Tipo de forno utilizado no tratamento térmico: (a) Parte externa (b) Parte interna.



(a)

(b)

Fonte: Autor, 2021.

As amostras foram tratadas com um controle das variáveis tempo e temperatura, juntamente com a velocidade de aquecimento do forno. A definição dos valores das mesmas teve como base o trabalho de Morsi e Basha (2011), sendo apresentada na Tabela 10 a divisão das amostras com base no controle das variáveis mencionadas anteriormente.

Tabela 10 - Classificação das amostras de vidro para o tratamento térmico.

Tipo	Identificação	Velocidade de aquecimento do forno [°C/min]	Temperatura de tratamento [°C]	Tempo de tratamento [min]
Temperado	T ₀	-	-	-
	T ₁	10	700	180
	T ₂	10	700	360
	T ₃	10	750	180
	T ₄	10	800	180
	T ₅	10	900	180
Laminado	L ₀	-	-	-
	L ₁	10	700	180
	L ₂	10	700	360
	L ₃	10	750	180
	L ₄	10	800	180
	L ₅	10	900	180
Bronze	B ₀	-	-	-
	B ₁	10	700	180
	B ₂	10	800	180
	B ₃	10	900	180

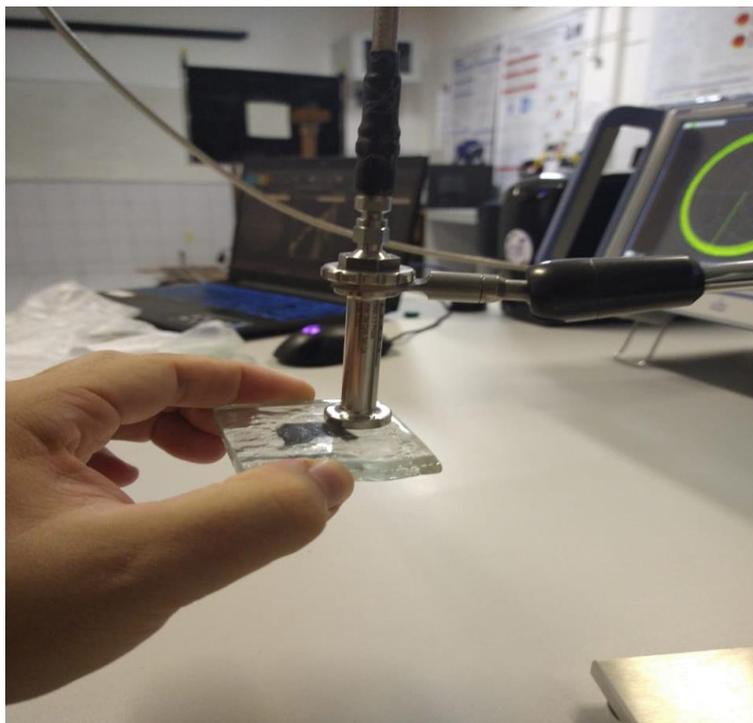
Fonte: Autor, 2021.

As amostras classificadas como T₀, L₀ e B₀ correspondem ao vidro no seu estado inicial, sendo as amostras de referência, antes de qualquer procedimento térmico. Foi escolhida uma velocidade de aquecimento relativamente lenta para os fornos, evitando-se que as amostras apresentassem rachaduras ou mesmo quebrassem. Foi aplicado um tempo de resfriamento lento nas amostras, sendo as mesmas mantidas no interior do forno e diminuindo sua temperatura juntamente com este último. As do tipo vidro bronze estavam disponíveis em

menor quantidade e algumas foram perdidas durante o processo, sendo a variedade de experimentos menor com as mesmas.

Após o processo de tratamento térmico, as amostras tiveram suas características eletromagnéticas mensuradas novamente, por meio da técnica mencionada na Subseção 3.3, estando o processo apresentado na Figura 46.

Figura 46 - Caracterização das amostras após o tratamento térmico.



Fonte: Autor, 2021.

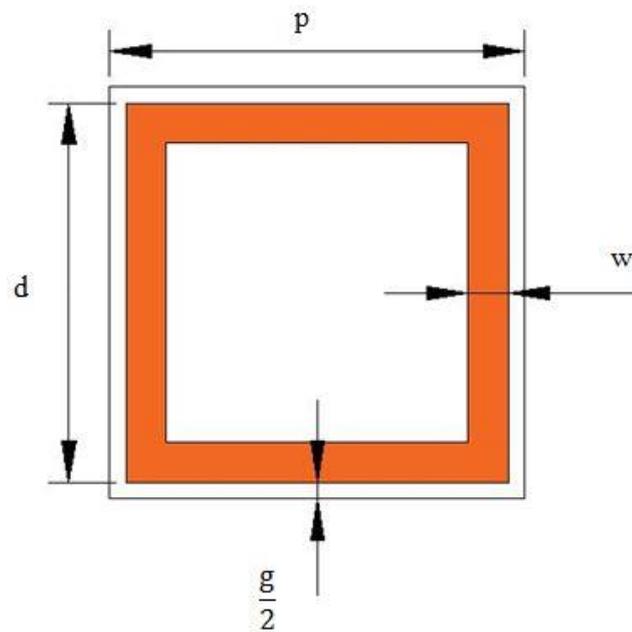
Determinadas as características eletromagnéticas das amostras, foi possível dimensionar os elementos da *FSS* para ressoar no intervalo de frequência desejado.

3.5 Dimensionamento da *FSS*

As *FSS* foram dimensionadas usando-se o MCE, tomando como base as equações apresentadas na Subseção 2.1.4.1 para a espira quadrada. Para tal, foi feita uma adaptação do algoritmo apresentado por Campos (2009), para análise da espira quadrada. O código originalmente faz a análise da resposta em frequência da *FSS*, em um intervalo de frequência especificado. Com a modificação, o código passou a dimensionar a espira quadrada para ressoar em uma determinada frequência.

Para que o algoritmo faça o dimensionamento da *FSS*, é necessário especificar a permissividade relativa e a espessura do substrato de vidro, sendo utilizados os valores obtidos por meio das medições no vidro antes do processo de tratamento térmico. O dimensionamento tem como principal objetivo encontrar os valores dos parâmetros físicos p , d , w e g , apresentados na Figura 47, para a espira quadrada. Foi escolhido um período $p = 25$ mm, sendo esse valor escolhido para facilitar o processo de fabricação das *FSS*.

Figura 47 - Parâmetros físicos considerados para a espira quadrada.



Fonte: Autor, 2021.

Para realizar o dimensionamento das demais dimensões da *FSS* é necessário fazer uma modificação nas Equações 2 e 4 para a reatância e a susceptância, respectivamente. Para encontrar o valor dos demais parâmetros, varia-se o tamanho da espira d e analisa-se o comportamento da potência transmitida, tomando-se como valor ótimo, aquele em que a espira apresentar o menor coeficiente de transmissão. Logo, é preciso que as variáveis w e g sejam escritas em função de d , conforme as Equações 18 e 19.

$$g = p - d = 25 - d \quad (18)$$

$$w = \Delta x d \quad (19)$$

Sendo delta (Δ) uma constante que pode ser escolhida de forma arbitrária. Substituindo-se as Equações 18 e 19 nas Equações 8 e 10, obtêm-se as Equações 20 e 21 usadas para dimensionar a *FSS*.

$$\frac{X_L}{Z_0} = \frac{d}{25} F(25, 2\Delta xd, \lambda, \varphi) \quad (20)$$

$$\frac{B_C}{Z_0} = 4\varepsilon_r \frac{d}{25} F(25, 25 - d, \lambda, \theta) \quad (21)$$

Segundo Munk (2000) e Hong et al. (2018) a diminuição entre os espaçamentos das células unitárias de uma *FSS*, diminuição do g da Figura 10, melhora a estabilidade angular da estrutura. Pela Equação 18 pode-se notar que esse valor diminui quando o tamanho da espira está próximo do seu período. Assim, d será tomando tão próximo quanto possível de p durante o dimensionamento, tendo valor máximo de 23 mm. Para diminuir a interferência da *FSS* na passagem de luz pelo vidro, o valor da constante Δ foi tomado pequeno, conseqüentemente, diminuindo a largura da espira, tendo a mesma um valor máximo de 2,3 mm caso d chegue a seu valor limite. Quanto aos ângulos de incidência, a estrutura foi dimensionada considerando-se uma incidência normal para as polarizações vertical e horizontal, sendo apresentados na Tabela 11 os valores dos dados de entrada do algoritmo.

Tabela 11 - Variáveis de entrada para o algoritmo de dimensionamento da *FSS*.

Parâmetro	Valor
Frequência de operação	2,45 GHz
Permissividade relativa	3,75
Espessura do vidro	3,89 mm
Ângulo de incidência vertical	0°
Ângulo de incidência horizontal	0°
Constante Δ	0,10
Valor inicial de d	10,00 mm
Valor final de d	23,00 mm
Incremento de d	0,10 mm

Os valores para a permissividade relativa e espessura foram obtidos a partir das medições iniciais, conforme apresentado na Subseção 3.3. Os mesmos correspondem à amostra de vidro bronze, sendo este tipo escolhido para servir de substrato para a *FSS*, sendo os motivos da escolha do mesmo, discutidos na Seção 4. A Tabela 12 apresenta as dimensões encontradas por meio do algoritmo.

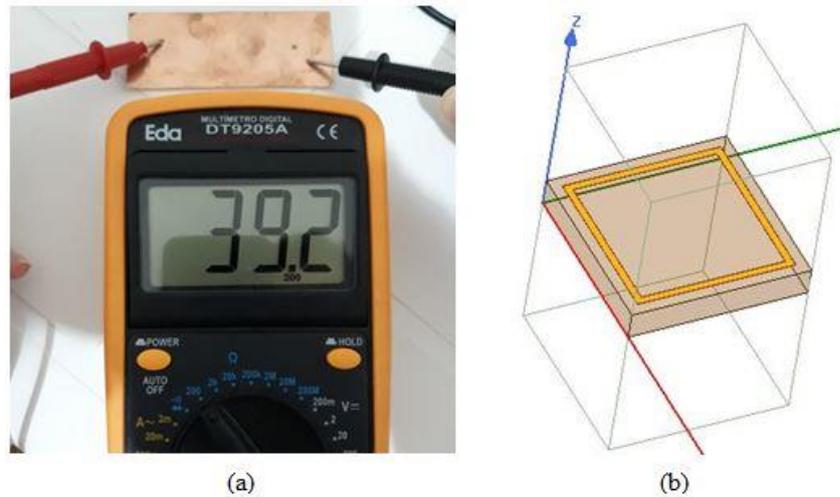
Tabela 12 - Dimensões da *FSS* obtidas por meio do algoritmo.

Parâmetro	Dimensão [mm]
p	25,0
d	22,0
w	2,2
g	6,0

Fonte: Autor, 2021.

Entretanto, para que os elementos da *FSS* ficassem mais próximos entre si, o valor de *d* foi alterado para *d* = 23 mm e realizado um estudo paramétrico em *w* para reajuste da frequência de ressonância. Uma vez determinada às dimensões da estrutura a mesma foi modelada e simulada, com auxílio do *software* validado comercialmente *Ansys HFSS*[®]. A condutividade da fita de cobre foi calculada por meio de sua resistência, sendo obtido o valor de $2,4695 \times 10^4$ S/m. As simulações foram realizadas na faixa de frequência de 1 GHz a 4 GHz e com 451 pontos. As mesmas têm o objetivo de verificar a resposta em frequência da *FSS* e constatar o seu funcionamento como filtro rejeita-faixa no intervalo de frequência especificado, atendendo toda a faixa de operação dos padrões *IEEE 802.11b* e *IEEE 802.11g* para a frequência especificada. A Figura 48(a) apresenta a medição da resistência da fita de cobre, enquanto a Figura 48(b) apresenta a *FSS* no ambiente de simulação.

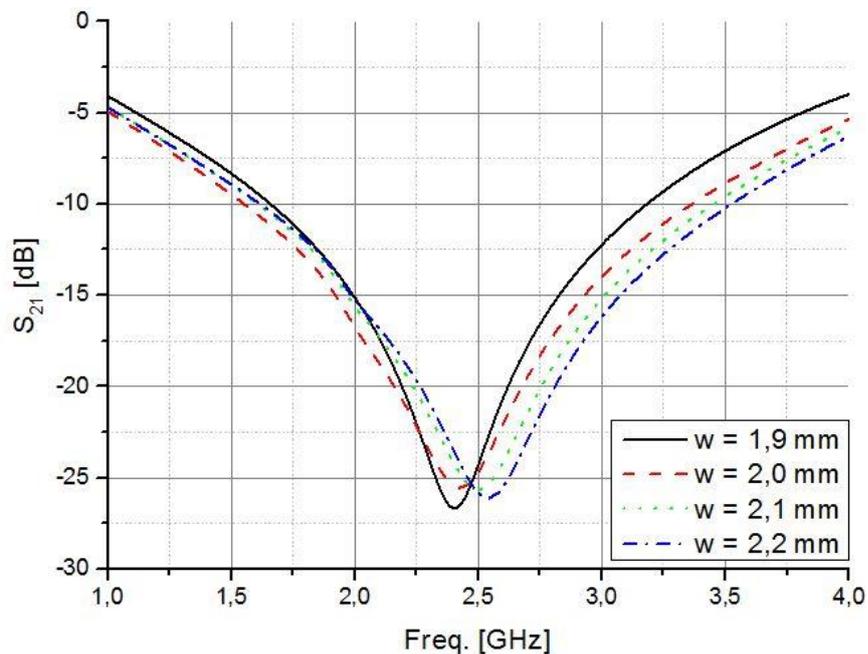
Figura 48 – Simulação da *FSS*: (a) Medição da resistência da fita de cobre (b) Ambiente de simulação.



Fonte: Autor, 2021.

A Figura 49 apresenta um gráfico com o resultado do estudo paramétrico.

Figura 49 - Estudo paramétrico da espessura w da espira.



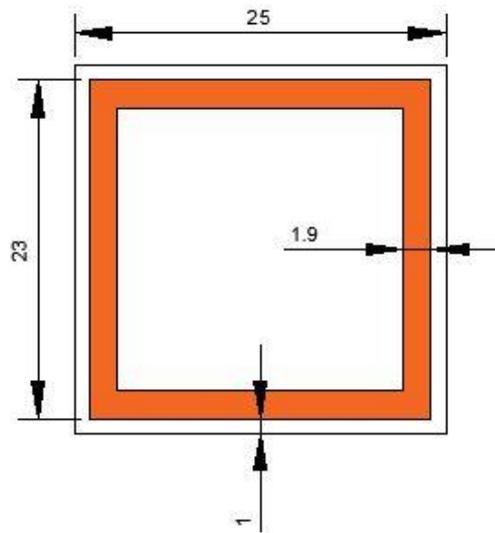
Fonte: Autor, 2021.

Conforme a Figura 49, a *FSS* ressoou no intervalo de frequência desejado para $w = 1,9$ mm, sendo esse valor adotado para a construção dos protótipos com substrato de vidro. A partir do estudo paramétrico pode-se notar que a diminuição da espessura w provoca uma diminuição na frequência de ressonância da *FSS*. A Tabela 13 apresenta as dimensões finais dos elementos individuais, enquanto a Figura 50 apresenta a estrutura com suas dimensões finais.

Tabela 13- Dimensões finais dos elementos da *FSS*.

Parâmetro	Dimensão [mm]
p	25,0
d	23,0
w	1,9
g	2,0

Fonte: Autor, 2021.

Figura 50 - Dimensões finais da *FSS* em mm.

Fonte: Autor, 2021.

A Tabela 14 apresenta os detalhes de ressonância para a *FSS* com suas dimensões finais, incluindo o intervalo de operação no limiar de ressonância para $S_{21} = -10$ dB (SEGUNDO, 2014).

Tabela 14 - Características de ressonância da *FSS* simulada.

Frequência de ressonância [GHz]	S_{21} na frequência de ressonância [dB]	Intervalo de operação [GHz]
2,41	-26,47	1,66 – 3,18

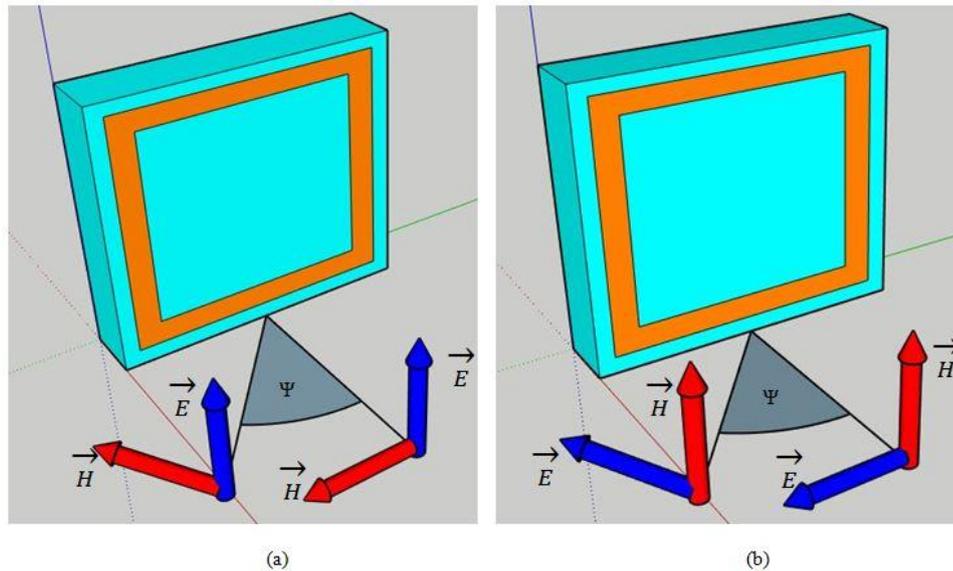
Fonte: Autor, 2021.

Nota-se que a estrutura apresentou desempenho satisfatório nas simulações, atuando como filtro rejeita-faixa no intervalo especificado. Os detalhes da análise de estabilidade angular da estrutura são discutidos na Subseção 3.6.

3.6 Análise de estabilidade angular

A análise de estabilidade angular foi realizada a partir da variação de incidência da onda eletromagnética no ângulo de elevação do plano que contém a *FSS*, para a polarização vertical e horizontal. A Figura 51 apresenta a variação no ângulo de elevação para as polarizações, sendo que o ângulo de elevação Ψ (Psi) tem sua variação no intervalo de 0° a 30° com incremento de 10° .

Figura 51 - Variação do ângulo de incidência no plano de elevação: (a) Polarização vertical (b) Polarização horizontal.



Fonte: Autor, 2021.

A Figura 52 apresenta o sistema do *setup* de medição utilizado para medir a variação do ângulo de incidência. O mesmo foi construído utilizando-se um transferidor preso a base de conexão da *FSS* e uma linha alinhada com a antena transmissora. O desempenho de estabilidade angular foi avaliado com base nas Equações 22 e 23, para a variação da frequência de ressonância (f_r) e largura de banda (BW), respectivamente (SIVASAMY; KANAGASABAI, 2015).

$$\frac{f_{r, \varphi, \theta \text{máx}}}{f_{r, \varphi, \theta = 0^\circ}} \quad (22)$$

$$\frac{BW_{\varphi, \theta \text{máx}}}{BW_{\varphi, \theta = 0^\circ}} \quad (23)$$

Sendo $\varphi, \theta_{m\acute{a}x}$ os ângulos para a máxima variação de f_r e BW com a incidência oblíqua para a polarização vertical e horizontal. O desempenho foi considerado satisfatório quando a estrutura atuava como filtro rejeita-faixa no intervalo especificado.

Figura 52 – Sistema utilizado para medir a variação do ângulo de incidência.



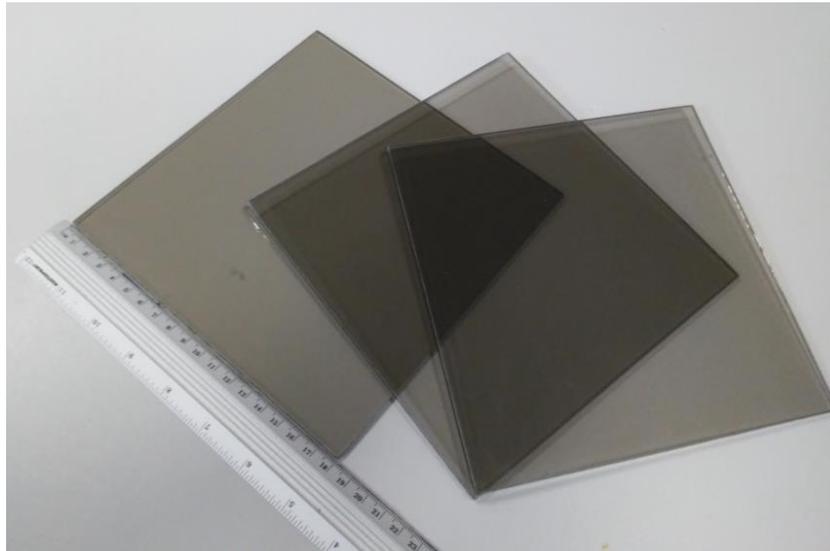
Fonte: Autor, 2021.

A análise de estabilidade angular tem como objetivo verificar se o dispositivo proposto é capaz de bloquear o sinal do intervalo de frequência desejado, para diferentes ângulos de incidência da onda eletromagnética.

3.7 Construção das *FSS* para medição

As *FSS* para medição foram construídas usando-se um substrato de vidro bronze com dimensões 180 mm x 180 mm, pois essas são dimensões mínimas que a estrutura deveria ter para que pudesse ser medida no *setup* utilizado. Foram usados dois substratos de vidro, sendo um em estado inicial, sem qualquer tipo de procedimento térmico, e o outro tratado termicamente com o controle das variáveis tempo e temperatura para as amostras B_1 , conforme Tabela 10 da Subseção 3.4. A Figura 53 apresenta as amostras de vidro usadas como substrato.

Figura 53 - Amostras de vidro utilizadas como substrato.



Fonte: Autor, 2021.

A Figura 54 apresenta o forno utilizado no processo de tratamento térmico do substrato utilizado para construir a *FSS*. O mesmo é maior, em dimensões físicas, do que o forno apresentado na Subseção 3.4, porém apresenta as mesmas características de aquecimento e controle de temperatura.

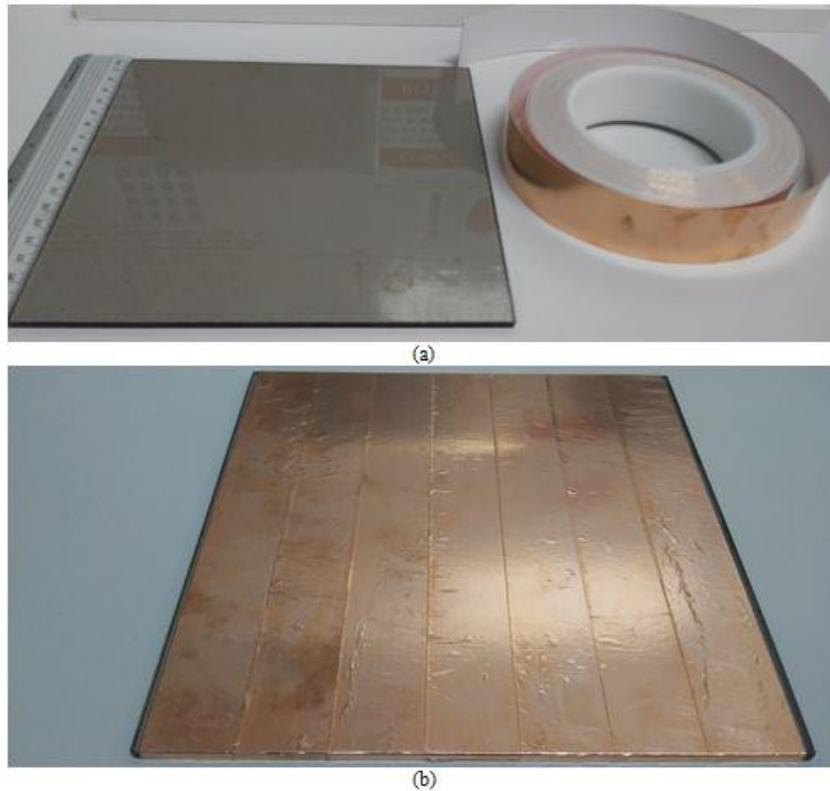
Figura 54 – Forno utilizado no processo de tratamento térmico do substrato da *FSS*.



Fonte: Autor, 2021.

A parte metálica da *FSS* foi disposta na superfície do vidro por meio do uso de uma fita de cobre, com largura de 30 mm. O substrato de vidro foi previamente revestido com a fita condutora, conforme apresentado na Figura 55.

Figura 55 – Materiais utilizados para construção: (a) Substrato de vidro e fita de cobre (b) Substrato revestido.



Fonte: Autor, 2021

O desenho da *FSS* foi passado para a superfície do cobre por meio de uma máquina de impressão UV. O desenho foi disposto de modo que a região de encontro entre duas camadas de fita, sempre estivessem entre um elemento e outro. A Figura 56 apresenta o processo de impressão na superfície revestida com cobre.

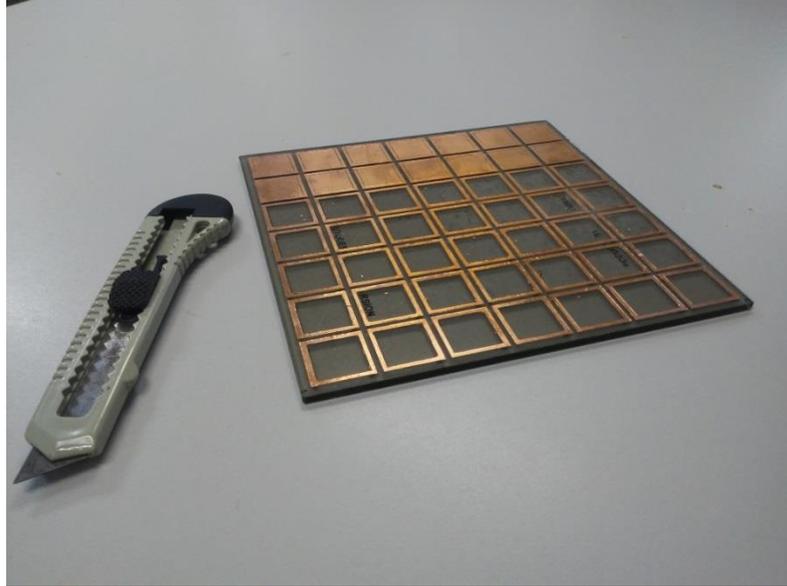
Figura 56 – Processo de impressão da *FSS* no substrato de vidro.



Fonte: Autor, 2021.

Após o processo de transferência, o excesso de cobre foi retirado com o auxílio de um estilete e uma régua. A Figura 57 apresenta a *FSS* no processo de retirada do excesso de cobre.

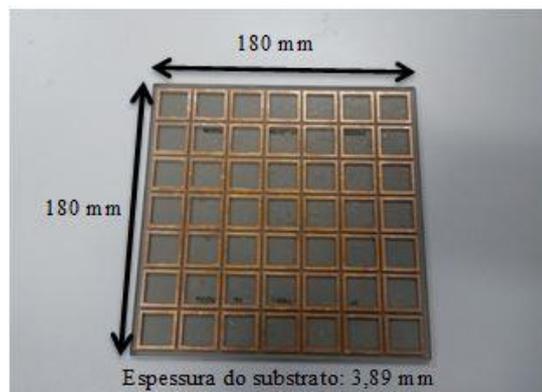
Figura 57 - *FSS* durante o processo de retirada do excesso de cobre.



Fonte: Autor, 2021.

Concluída a etapa anterior, as *FSS* foram limpas e polidas com o auxílio de palha de aço. A Figura 58 apresenta a estrutura com substrato comum no seu estado final, pronta para o processo de medição.

Figura 58 - *FSS* com substrato comum finalizada e pronta para ser medida.



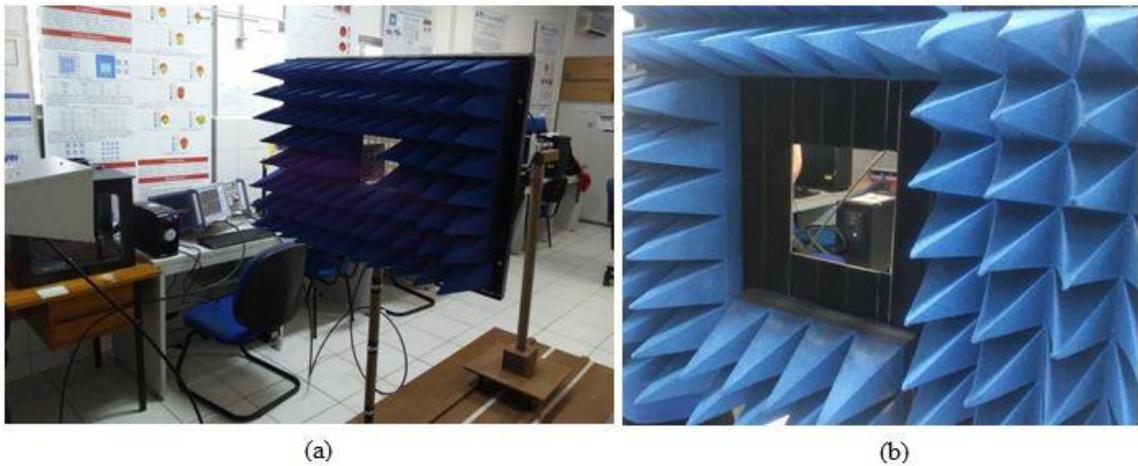
Fonte: Autor, 2021.

O *setup* utilizado e o procedimento da medição são apresentados na Subseção 3.8.

3.8 Medição das FSS

A resposta em frequência dos protótipos foi analisada através de medições, usando-se o método de transmissão e reflexão no espaço livre, no intervalo de frequência de 1,0 GHz a 4,0 GHz. Foram utilizadas duas antenas corneta, um suporte com absorvedores para conexão das FSS e um VNA R&S® ZND 100 kHz-8,5 GHz, sendo apresentado na Figura 59 o *setup* utilizado para medição. Para realização das medições de análise de estabilidade angular, foi realizado o afastamento dos absorvedores da abertura do *setup*, evitando-se interferência.

Figura 59 – *Setup* utilizado para medição das FSS: (a) *Setup* completo (b) Detalhe do afastamento.



Fonte: Autor, 2021.

O afastamento dos absorvedores até a borda da abertura é de aproximadamente 14 cm. A Seção V apresenta os resultados obtidos por meio da aplicação dos materiais e métodos apresentados nesta seção.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos nesta pesquisa. Primeiramente são apresentados os resultados obtidos por meio da caracterização eletromagnética das amostras de vidro. Em seguida, são apresentados e discutidos os resultados do tratamento térmico e seu efeito nos parâmetros eletromagnéticos. Por fim, são abordados os resultados da caracterização das *FSS*.

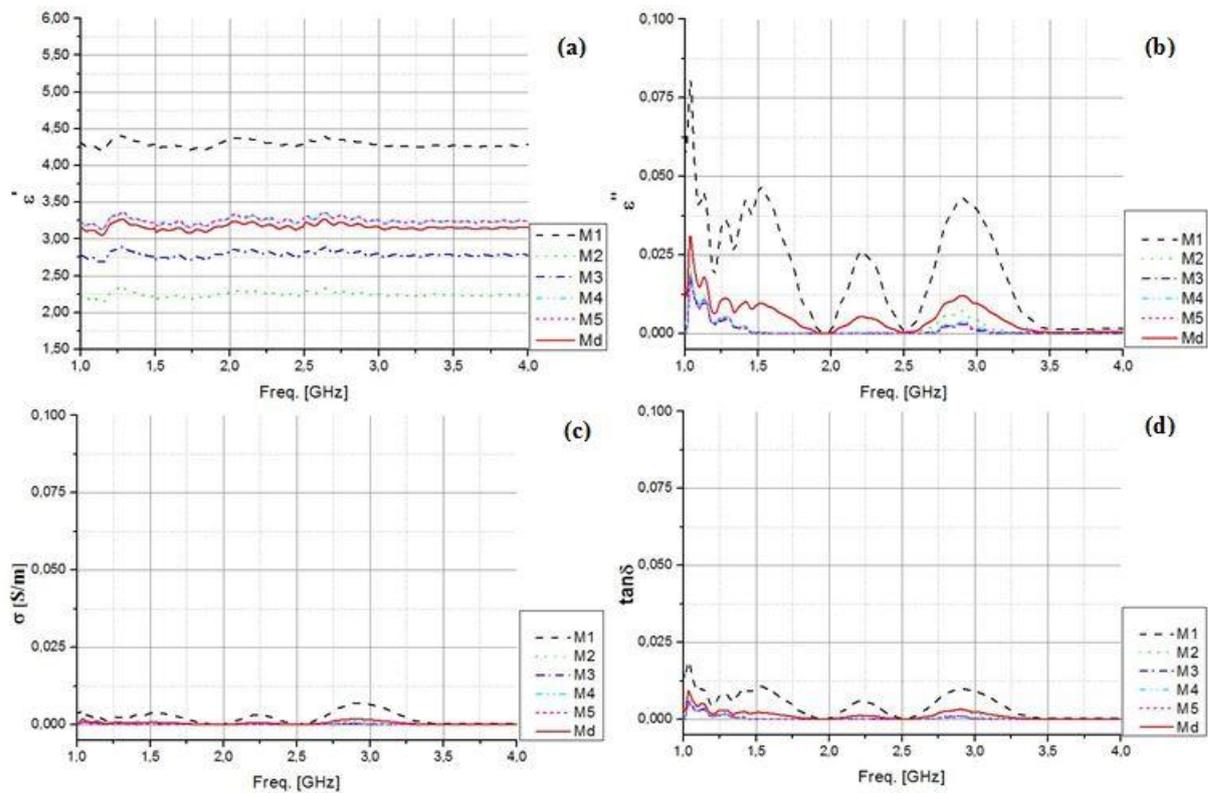
4.1 Parâmetros eletromagnéticos iniciais das amostras de vidro

Nesta subseção serão apresentados os resultados das medições de alguns parâmetros eletromagnéticos das amostras de vidro, antes das mesmas passarem pelo tratamento térmico.

4.1.1 Parâmetros eletromagnéticos do vidro temperado

Durante as medições dos parâmetros eletromagnéticos foram observadas variações nos valores dos mesmos, para diferentes regiões de posicionamento da sonda coaxial nas amostras de vidro. Isso evidencia uma falta de homogeneidade do material em relação aos parâmetros medidos, como foi observado por Gustafsson et al. (2006) e LIU et al. (2020). Foram realizadas cinco medições, enumeradas de M1 a M5, em diferentes áreas da amostra. A Figura 60 apresenta os resultados obtidos para a os parâmetros do vidro temperado, estando presente também o valor médio, M_d , obtido nas medições.

Figura 60 – Parâmetros do vidro temperado antes do tratamento térmico: (a) Constante dielétrica (b) Constante de perdas (c) Condutividade (d) Tangente de perdas.



Fonte: Autor, 2021.

A Partir da Figura 60(a) pode-se notar que a constante dielétrica apresentou valores entre 2,1 e 4,8 em toda a faixa de frequência de medição. Em (GHODGAONKAR; VARADAN; VARADAN, 1990) foi apresentado um valor de 4,38 para uma frequência de 8,6 GHz. Pode-se notar que as medições individuais não apresentaram grandes variações em seus valores em função da frequência como observado por Martiessen e Warlimont (2005).

A Figura 60(b) apresenta o resultado das medições para a constante de perdas. A enumeração das medições está de acordo com as apresentadas para a constante dielétrica e observa-se que o valor médio da constante de perdas encontra-se entre 0,000 e 0,050. A Figura 60(c) apresenta os resultados das medições para a condutividade em S/m. Morsi e Basha (2011) obtiveram valores próximos de $\sigma \approx 10^{-5}$ S/m para uma frequência de 1 MHz, sendo observado ainda que a condutividade aumentava juntamente com a frequência de medição.

A Figura 60(d) apresenta os resultados das medições para a tangente de perdas. Foram observados valores próximos de $1,0 \times 10^{-3}$, estando próximo aos medidos por Martiessen e

Warlimont (2005). A Tabela 15 apresenta o valor médio dos parâmetros eletromagnéticos apresentados anteriormente, para a frequência de 2,45 GHz.

Tabela 15 - Valores médios dos parâmetros eletromagnéticos da amostra de vidro temperado para a frequência de 2,45 GHz.

Parâmetro	Valor médio
Constante dielétrica	3,13280
Constante de perdas	0,00040
Condutividade [S/m]	0,00002
Tangente de perdas	0,00008

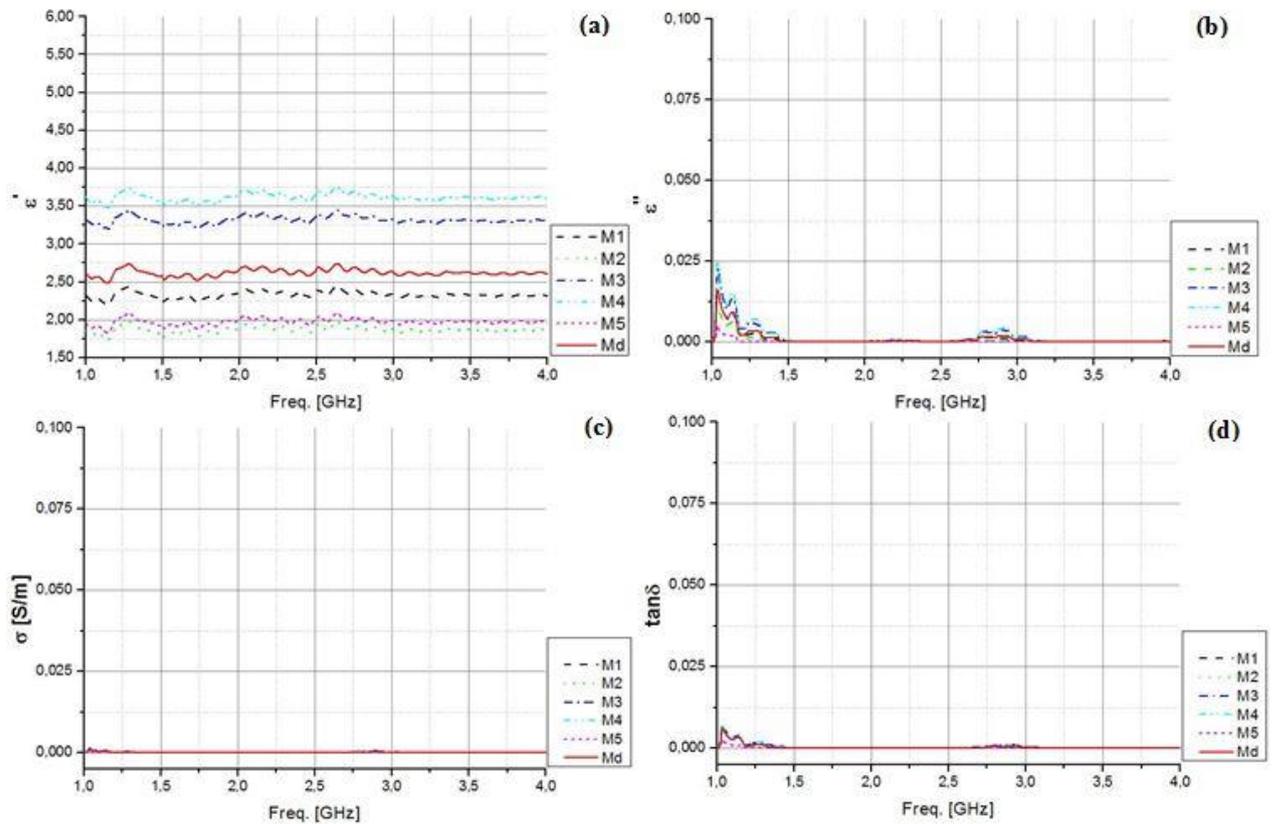
Fonte: Autor, 2021.

Na Subseção 4.1.2 são apresentados e discutidos os resultados obtidos para o vidro laminado.

4.1.2 Parâmetros eletromagnéticos do vidro laminado

A Figura 61 apresenta o gráfico do comportamento para os parâmetros do vidro laminado, num intervalo de frequência de 1,0 GHz a 4,0 GHz.

Figura 61 – Parâmetros do vidro laminado antes do tratamento térmico: (a) Constante dielétrica (b) Constante de perdas (c) Condutividade (d) Tangente de perdas.



Fonte: Autor, 2021.

O vidro laminado apresentou um valor médio menor que o vidro temperado para os parâmetros medidos. Assim como o vidro temperado, o laminado apresentou valores baixos para a constante de perdas no intervalo medido. A Tabela 16 apresenta os valores médios dos parâmetros medidos para o vidro laminado na frequência de 2,45 GHz.

Tabela 16 - Parâmetros para a amostra de vidro laminado medidos a frequência de 2,45 GHz.

Parâmetro	Valor médio
Constante dielétrica	2,58084
Constante de perdas	0,00012
Condutividade [S/m]	0,00000
Tangente de perdas	0,00006

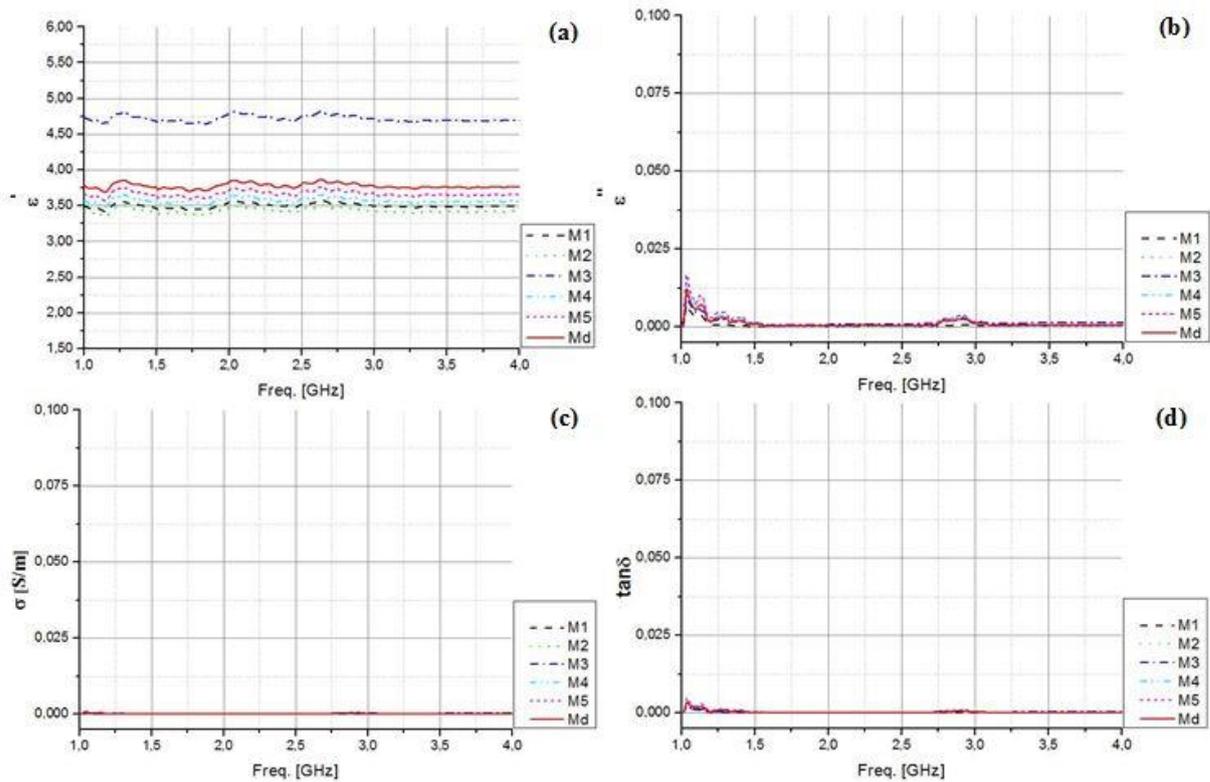
Fonte: Autor, 2021.

Fazendo-se uma comparação entre as Tabelas 15 e 16, nota-se que o vidro laminado apresentou valores menores que o vidro temperado para os parâmetros medidos. A Subseção 4.1.3 apresenta os resultados obtidos para o vidro bronze.

4.1.3 Parâmetros eletromagnéticos do vidro bronze

A Figura 62 apresenta o gráfico para as medições dos parâmetros do vidro bronze, sendo observada menor variação nos valores medidos quando comparado ao vidro temperado e laminado.

Figura 62 - Parâmetros eletromagnéticos do vidro bronze: (a) Constante dielétrica (b) Constante de perdas (c) Condutividade (d) Tangente de perdas.



Fonte: Autor, 2021.

A partir dos gráficos da Figura 62 é possível notar que houve pouca variação em função da frequência de medição dos parâmetros mensurados. A Tabela 17 apresenta os valores médios dos parâmetros medidos para a frequência de 2,45 GHz.

Tabela 17 - Valores médios dos parâmetros medidos a frequência de 2,45 GHz.

Parâmetro	Valor médio
Constante dielétrica	3,75002
Constante de perdas	0,00038
Condutividade [S/m]	0,00002
Tangente de perdas	0,00012

Fonte: Autor, 2021.

Dentre as amostras caracterizadas, o vidro bronze apresentou o maior valor médio para a constante dielétrica. Na Subseção 4.2 são apresentados e analisados os efeitos do tratamento térmico nos parâmetros apresentados anteriormente, para as amostras de vidro estudadas.

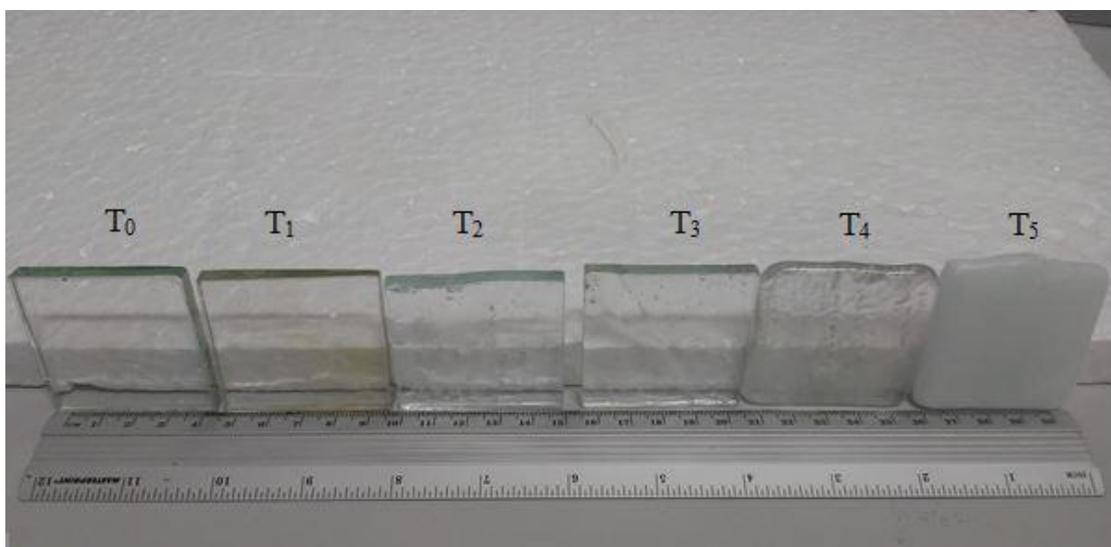
4.2 Efeitos do tratamento térmico

Nesta seção são apresentados os efeitos do tratamento térmico nos parâmetros eletromagnéticos estudados das amostras, bem como na transparência das mesmas.

4.2.1 Efeitos no tratamento térmico no vidro temperado

A Figura 63 apresenta um comparativo entre a aparência das amostras para diferentes tempos e temperaturas, estando codificadas de acordo com a Tabela 10 da Subseção 3.4. A partir da Figura 63 nota-se um aumento da opacidade das amostras, devido ao processo de cristalização do vidro. Como observado por Redkov et al. (2019), o vidro com concentração de 72% de sílica apresenta um processo de cristalização, tornando-se opaco, em temperaturas próximas de 780 °C.

Figura 63 - Efeito do tratamento térmico na aparência do vidro temperado.

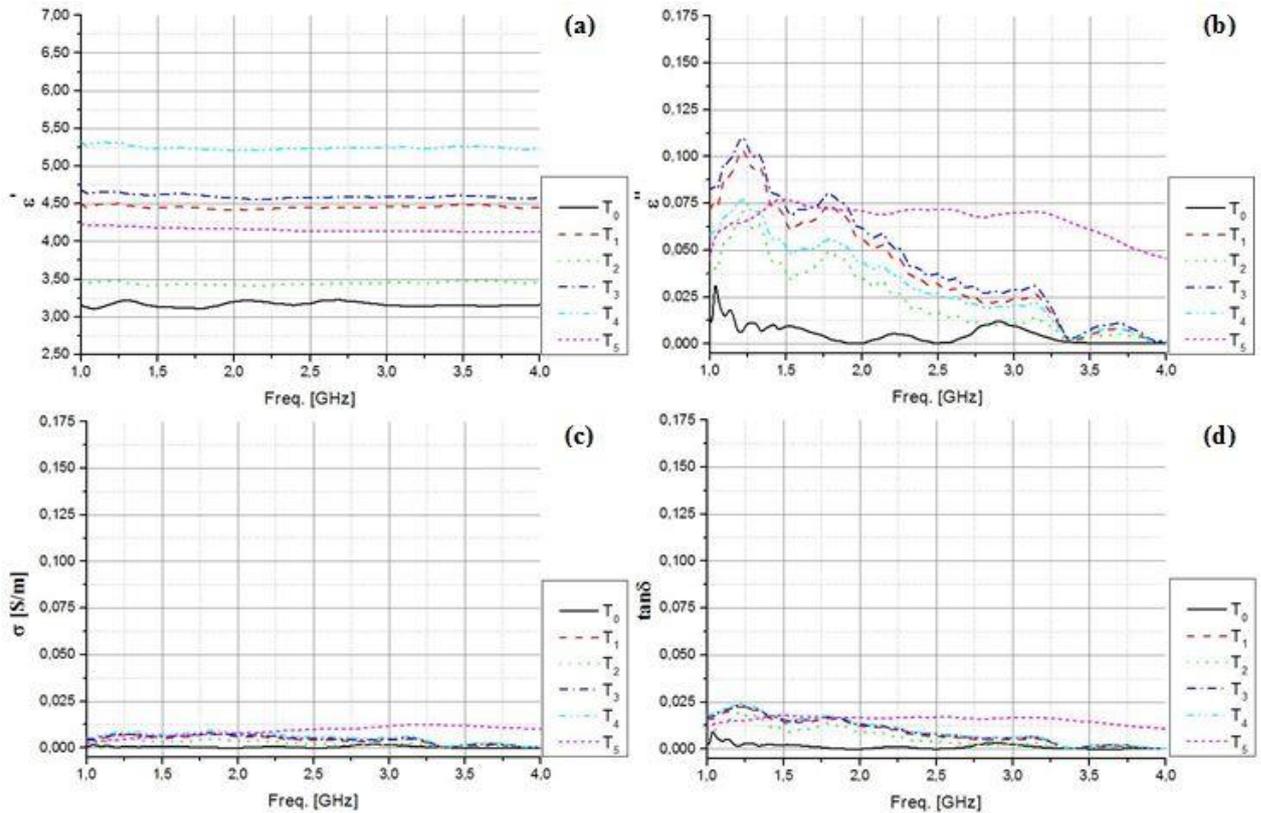


Fonte: Autor, 2021.

A amostra T₅, que passou pelo tratamento a 900 °C tornou-se totalmente opaca, apresentando deformação física. Todas as amostras de T₂ a T₅ apresentaram deformação. A seguir são analisados os efeitos do tratamento térmico nos parâmetros eletromagnéticos estudados. A Figura 64 apresenta um gráfico com a evolução dos parâmetros

eletromagnéticos das amostras de vidro temperado devido ao processo de tratamento térmico, considerando-se o valor médio obtido nas medições.

Figura 64 - Evolução dos parâmetros do vidro temperado com o processo de tratamento térmico: (a) Constante dielétrica (b) Constante de perdas (c) Condutividade (d) Tangente de perdas.



Fonte: Autor, 2021.

A partir da Figura 64(a) nota-se um aumento do valor médio da constante dielétrica após o processo de tratamento térmico. O processo de tratamento térmico provoca a cristalização do vidro, modificando sua estrutura molecular (REDKOV et al., 2019). As diferenças de resistividade entre as matrizes cristalinas e vítreas podem causar um acúmulo de carga na região interfacial, o que geralmente leva a uma grande polarização de carga espacial e a elevação dos valores da permissividade relativa (MORSI e BASHA, 2011). Percebe-se ainda que o processo de tratamento que provocou a maior mudança na constante dielétrica foi o T_4 . Entretanto, devido à falta de homogeneidade observada nas amostras de vidro, não é possível afirmar que esse processo de tratamento apresentará os mesmos resultados em outras amostras. Porém, todos os processos de tratamento provocaram o aumento no valor médio da constante dielétrica.

A Figura 64(b) apresenta os resultados obtidos para a constante de perdas, sendo observado o aumento no valor médio da constante de perdas das amostras após o tratamento

térmico. A Figura 64(c) apresenta o comportamento da condutividade, com o processo de tratamento térmico. Também foi observado um aumento no valor médio medido para a condutividade após o procedimento, assim como observado por Morsi e Basha (2011).

A Figura 64(d) apresenta o efeito do tratamento térmico no comportamento da tangente de perdas do vidro temperado, sendo também observado um aumento em seu valor médio com o processo de tratamento térmico. A Tabela 18 apresenta os valores médios dos parâmetros apresentados na Figura 64, juntamente com a permissividade relativa, medidos a frequência de 2,45 GHz.

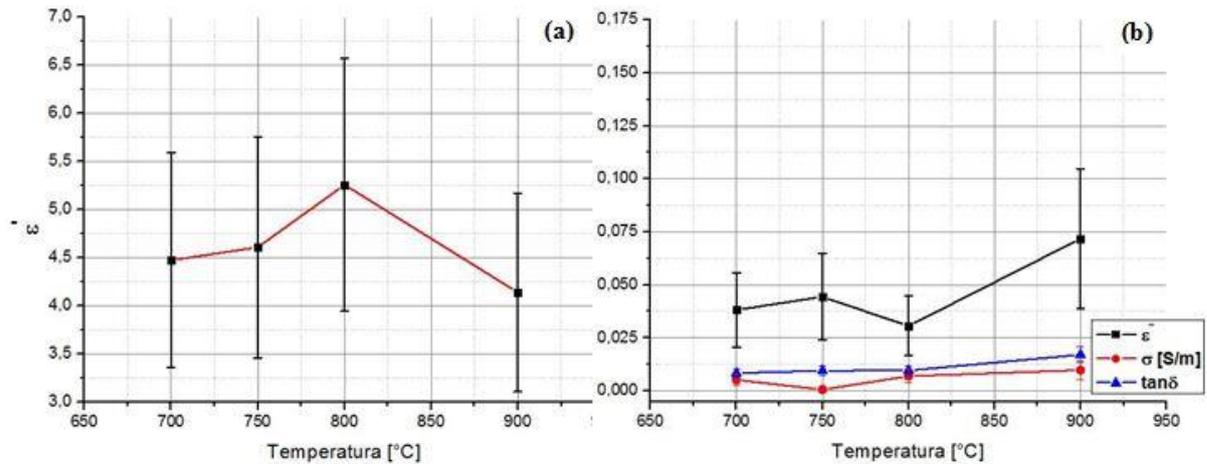
Tabela 18 – Parâmetros do vidro temperado medidos à frequência de 2,45 GHz.

	ϵ'	ϵ''	σ [S/m]	$\tan\delta$	$ \epsilon_r $
T₀	3,13280	0,00036	0,00002	0,00008	3,13280
T₁	4,47170	0,03817	0,00520	0,00841	4,47186
T₂	3,45478	0,02258	0,00306	0,00578	3,45485
T₃	4,60708	0,0444	0,00604	0,00948	4,60729
T₄	5,25573	0,03056	0,00697	0,00960	5,25582
T₅	4,13688	0,07185	0,00980	0,01717	4,13750

Fonte: Autor, 2021.

Nota-se a partir da Tabela 18 que os processos de tratamento térmico provocaram o aumento dos parâmetros analisados das amostras. O processo de tratamento que provocou a maior mudança no módulo da permissividade relativa foi o T₄, com um aumento de 67,77% em relação ao valor inicial. A Figura 65 apresenta a evolução dos parâmetros em função da temperatura de tratamento, para o tempo de duração do tratamento térmico de 180 minutos, sendo os valores medidos a uma frequência de 2,45 GHz.

Figura 65 - Comportamento da constante dielétrica em função da temperatura de tratamento: (a) Constante dielétrica (b) Demais parâmetros.



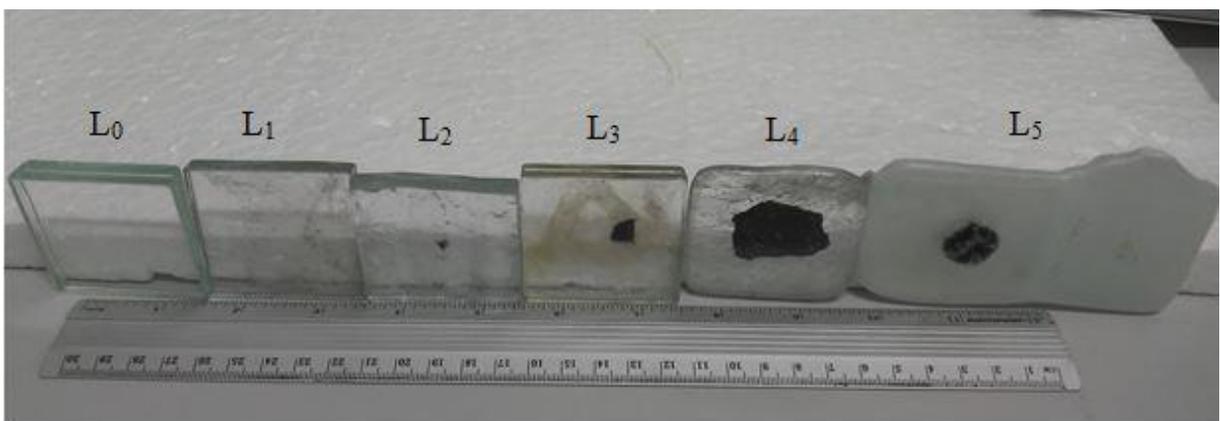
Fonte: Autor, 2021.

A partir da Figura 65, pode-se perceber um aumento no valor médio dos parâmetros medidos, devido ao incremento da temperatura de tratamento, apesar de haver pontos fora desse padrão de comportamento. Na Subseção 4.2.2 são analisados os efeitos do tratamento nos parâmetros do vidro laminado.

4.2.2 Efeitos do tratamento térmico no vidro laminado

A Figura 66 apresenta o estado das amostras de vidro laminado após o processo de tratamento térmico.

Figura 66 - Amostras de vidro laminado após o tratamento térmico.

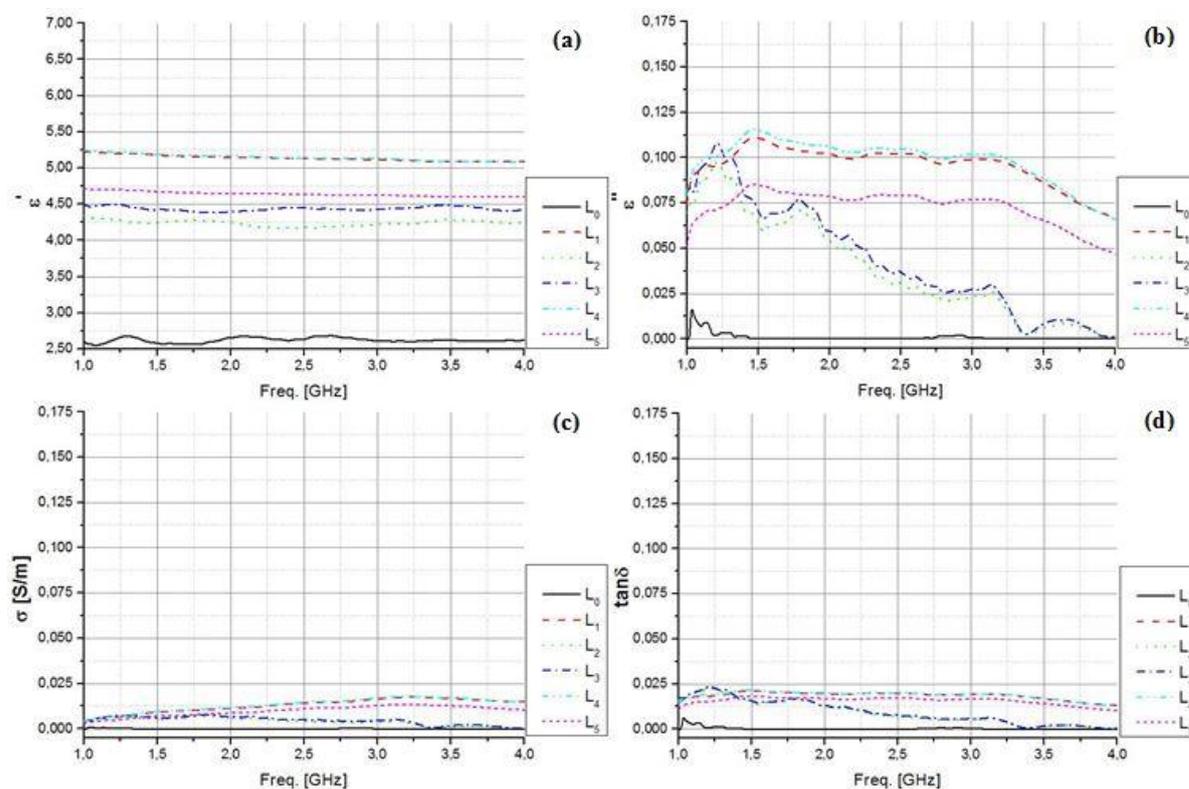


Fonte: Autor, 2021.

A partir da Figura 66 pode-se notar o aumento de opacidade das amostras, com o incremento da temperatura de tratamento, assim como observado para o vidro temperado. A cola que une as lâminas de vidro sofreu derretimento a partir do procedimento L₂,

apresentando uma coloração preta. Nos processos L₄ e L₅ as lâminas de vidro das amostras derreteram e uniram-se. A Figura 67 apresenta a evolução do valor médio dos parâmetros do vidro laminado, para os diferentes processos de tratamento.

Figura 67 - Evolução do valor médio dos parâmetros do vidro laminado: (a) Constante dielétrica (b) Constante de perdas (c) Condutividade (d) Tangente de perdas.



Fonte: Autor, 2021.

A partir da Figura 67(a) nota-se um aumento do valor médio da constante dielétrica com a aplicação dos processos de tratamento térmico. Os processos de tratamento L₁ e L₄ apresentaram resultados semelhantes, sendo que este último provocou o maior incremento no valor médio da constante dielétrica, medido a frequência de 2,45 GHz. A Figura 67(b) apresenta os resultados para a constante de perdas, sendo que os processos de tratamento L₁ e L₄ tiveram efeitos parecidos no valor médio da constante de perdas, assim como observado para a constante de dielétrica. Todos os processos provocaram um aumento no valor médio da constante de perdas.

Na Figura 67(c) estão apresentados os efeitos na condutividade, onde se pode notar que os processos de tratamento provocaram o aumento do valor médio, assim como foi observado para o vidro temperado. A Figura 67(d) apresenta os efeitos na tangente de perdas, sendo observado que, assim como nos demais parâmetros, o tratamento térmico provocou um

aumento no valor médio. A Tabela 19 apresenta o valor médio dos parâmetros apresentados acima medidos na frequência de 2,45 GHz.

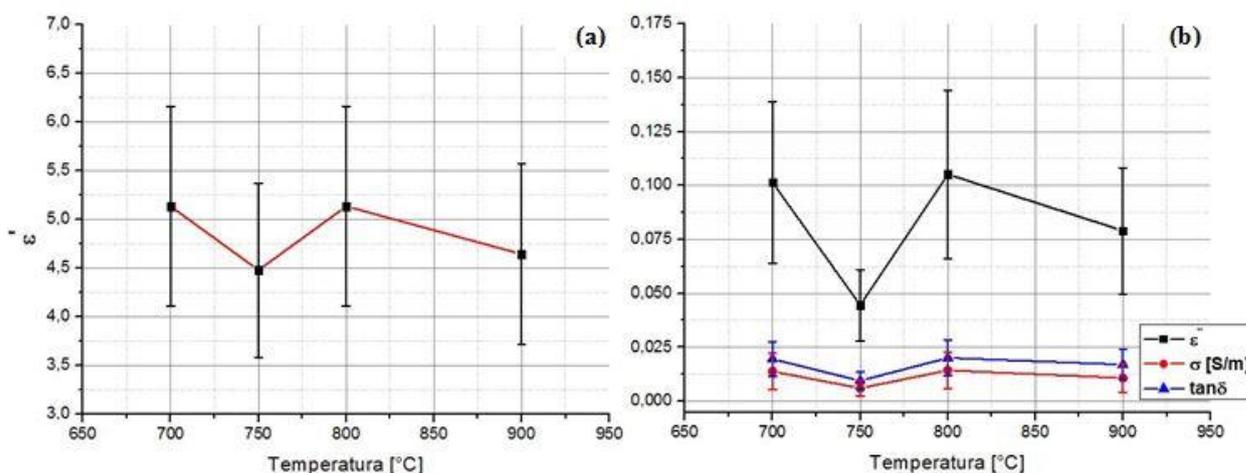
Tabela 19 - Parâmetros do vidro laminado medidos à frequência de 2,45 GHz.

	ϵ'	ϵ''	σ [S/m]	$\tan\delta$	$ \epsilon_r $
L₀	2,58084	0,00012	0,00000	0,00006	2,58084
L₁	5,13373	0,10145	0,01385	0,01963	5,13473
L₂	4,19240	0,03616	0,00492	0,00848	4,19255
L₃	4,47700	0,04455	0,00608	0,00953	4,47722
L₄	5,13422	0,10524	0,01436	0,02014	5,13530
L₅	4,64133	0,07907	0,01077	0,01077	4,64200

Fonte: Autor, 2021.

A partir da Tabela 19 pode-se notar numericamente o aumento do valor médio dos parâmetros medidos, devido aos processos de tratamento térmico. O processo de tratamento que provocou a maior mudança no módulo da permissividade relativa foi o L₄, com um aumento de 98,98% em relação ao valor inicial. A Figura 68 apresenta a evolução do valor médio dos parâmetros como função da temperatura de tratamento, com tempo de duração de 180 minutos, sendo os valores medidos na frequência de 2,45 GHz.

Figura 68 - Evolução do valor médio dos parâmetros para diferentes temperaturas de tratamento: (a) Constante dielétrica (b) Demais parâmetros.



Fonte: Autor, 2021.

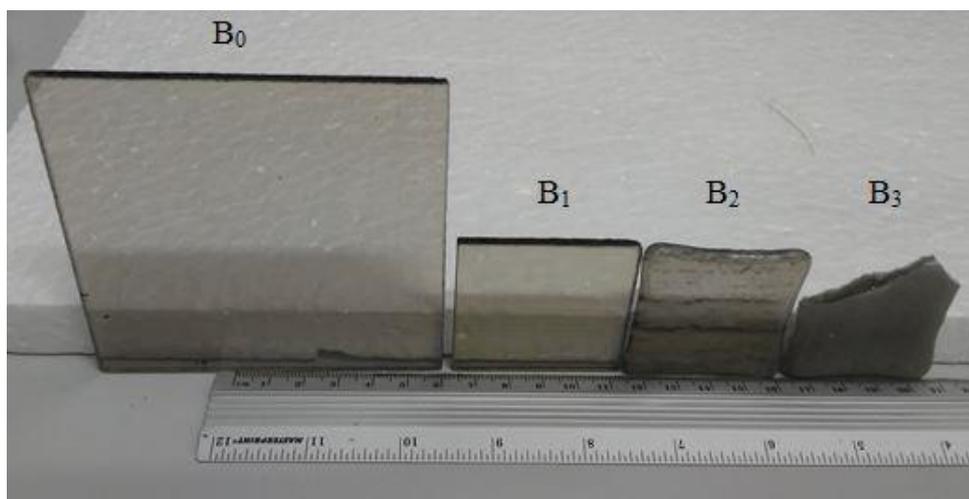
Uma comparação entre as Figuras 68(a) e 68(b) permite perceber um comportamento semelhante entre constante dielétrica, de perdas, condutividade e tangente de perdas devido à variação de temperatura nos processos de tratamento.

Na Subseção 4.2.3 são apresentados os resultados obtidos devido ao processo de tratamento térmico no vidro bronze.

4.2.3 Efeitos do tratamento térmico no vidro bronze

A Figura 69 apresenta os efeitos do tratamento térmico na aparência do vidro bronze. A partir do processo B₂ pode-se notar a ocorrência de deformação física das amostras, sendo que a B₃ apresentou rachaduras e quebrou.

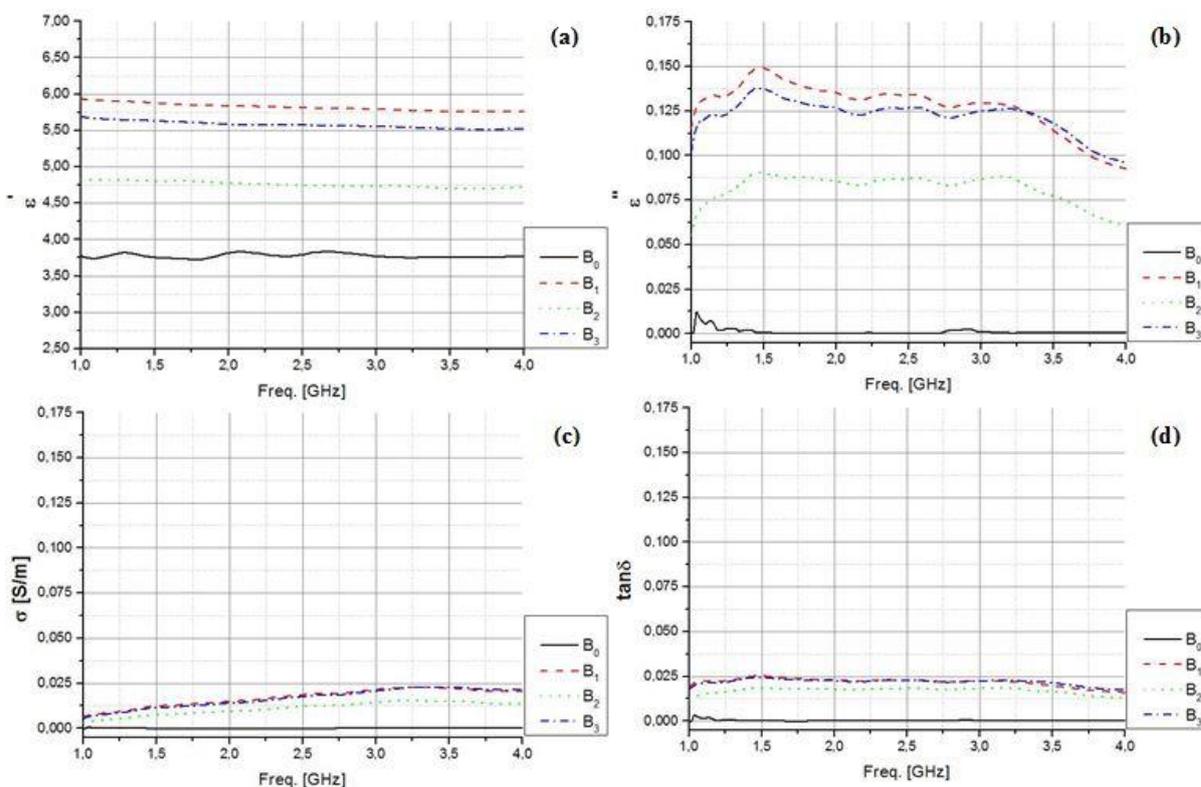
Figura 69 - Efeitos do tratamento térmico na aparência do vidro bronze.



Fonte: Autor, 2021.

A Figura 70 apresenta os efeitos do tratamento térmico no valor médio dos parâmetros das amostras de vidro bronze.

Figura 70 - Efeitos do tratamento térmico nos parâmetros do vidro bronze: (a) Constante dielétrica (b) Constante de perdas (c) Condutividade (d) Tangente de perdas.



Fonte: Autor, 2021.

Conforme a Figura 70(a), o processo de tratamento que provocou o maior aumento no valor médio da constante dielétrica foi B₁, cujas especificações são 700 °C por 180 minutos. A Figura 70(b) apresenta os efeitos do processo de tratamento na constante de perdas. Todos os processos de provocaram um aumento no valor médio do referido parâmetro, observando-se uma tendência de diminuição do efeito obtido com o tratamento devido ao aumento da frequência de medição. Os processos B₁ e B₃ apresentaram resultados semelhantes, provocando maior aumento no valor médio.

A Figura 70(c) apresenta os efeitos do tratamento térmico na condutividade das amostras de vidro bronze. Todos os processos provocaram o aumento do valor médio da condutividade, observando-se um efeito mais acentuado dos procedimentos B₁ e B₃. A partir dos gráficos da Figura 70(c), nota-se uma tendência de aumento da condutividade com a frequência de medição.

A Figura 70(d) apresenta os resultados obtidos para a tangente de perdas do vidro bronze, devido ao processo de tratamento. O comportamento da curva é semelhante àquele apresentado para a constante de perdas, uma vez que esses parâmetros estão relacionados. Os

processos de tratamento B₁ e B₃ provocaram a maior elevação do valor médio em relação ao valor inicial.

A Tabela 20 apresenta o valor médio dos parâmetros apresentados acima para o vidro bronze, medidos à frequência de 2,45 GHz.

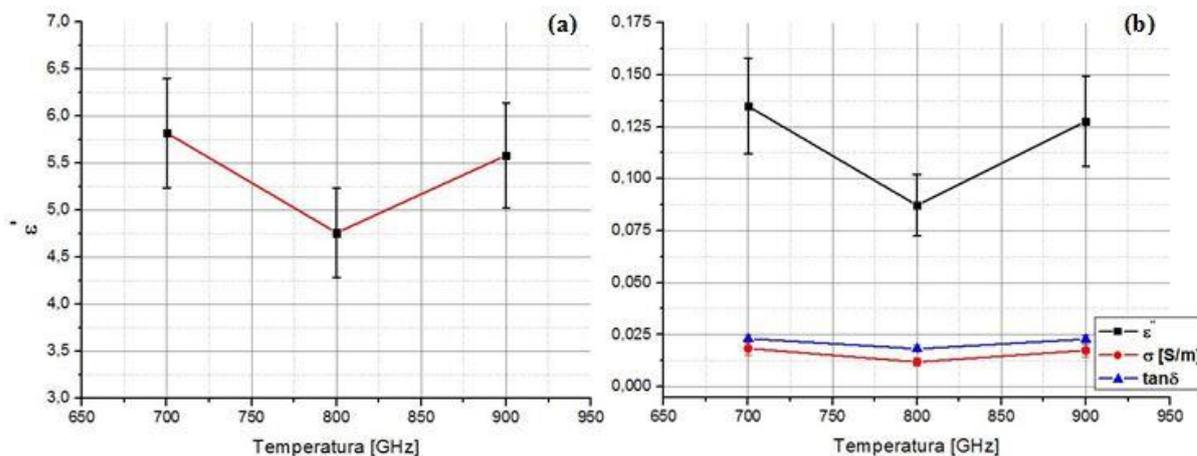
Tabela 20 - Parâmetros do vidro bronze medidos à frequência de 2,45 GHz.

	ϵ'	ϵ''	σ [S/m]	$\tan\delta$	$ \epsilon_r $
B₀	3,75002	0,00038	0,00002	0,00012	3,75002
B₁	5,82070	0,13487	0,01840	0,02315	5,82226
B₂	4,75827	0,08723	0,01190	0,01827	4,75910
B₃	5,58110	0,12767	0,01743	0,02287	5,58256

Fonte: Autor, 2021.

O processo de tratamento que provocou a maior mudança no módulo da permissividade relativa foi o B₁, provocando um aumento de 55,26% em relação ao valor inicial. A Figura 71 apresenta os efeitos das diferentes temperaturas de tratamento no valor médio dos parâmetros mensurados.

Figura 71 - Efeitos da elevação da temperatura de tratamento nos parâmetros do vidro bronze: (a) Constante dielétrica (b) Demais parâmetros.



Fonte: Autor, 2021.

A partir das Figuras 71(a) e 71(b), pode-se notar que todos os parâmetros apresentaram um comportamento semelhante com a elevação da temperatura de tratamento. A Tabela 21 apresenta um comparativo entre os processos de tratamento térmico que tiveram o maior efeito no módulo da permissividade relativa das amostras, uma vez que esse parâmetro

influencia na estabilidade angular da *FSS*. Também é levado em consideração o efeito do processo nas condições físicas das amostras.

Tabela 21 - Comparativo entre os processos de tratamento com maior efeito na permissividade relativa.

Tipo de vidro	ϵ_r Inicial	ϵ_r Final	Aumento [%]	Código do processo	Deformação física	Surgimento de opacidade
Temperado	3,13280	5,25582	67,77%	T ₄	Sim	Sim
Laminado	2,58084	5,13530	98,98%	L ₄	Sim	Sim
Bronze	3,75002	5,82226	55,26%	B ₁	Não	Não

Fonte: Autor, 2021.

A partir da Tabela 21, nota-se que a amostra de vidro laminado apresentou o maior aumento no módulo da permissividade relativa, em relação ao valor inicial, devido ao processo de tratamento térmico. Porém, a amostra apresentou deformação física e surgimento de opacidade devido ao processo em que o resultado foi alcançado, sendo um resultado semelhante obtido para o vidro temperado. Para a aplicação proposta nesta pesquisa, é necessário que o vidro mantenha sua transparência e não sofra deformações físicas.

O vidro bronze apresentou o maior valor final para o módulo da permissividade relativa, apesar de ter apresentado o menor aumento relativo devido ao processo de tratamento. Além disso, o processo que provocou esse aumento não provocou alterações físicas na amostra. Logo, o vidro bronze foi utilizado como substrato para as *FSS* propostas neste trabalho, conforme mencionado da Subseção 3.5. Esse tipo de vidro tem em sua composição a adição de óxido de ferro (Fe_2O_3), que lhe concede sua coloração distinta (SANTOS, 2009).

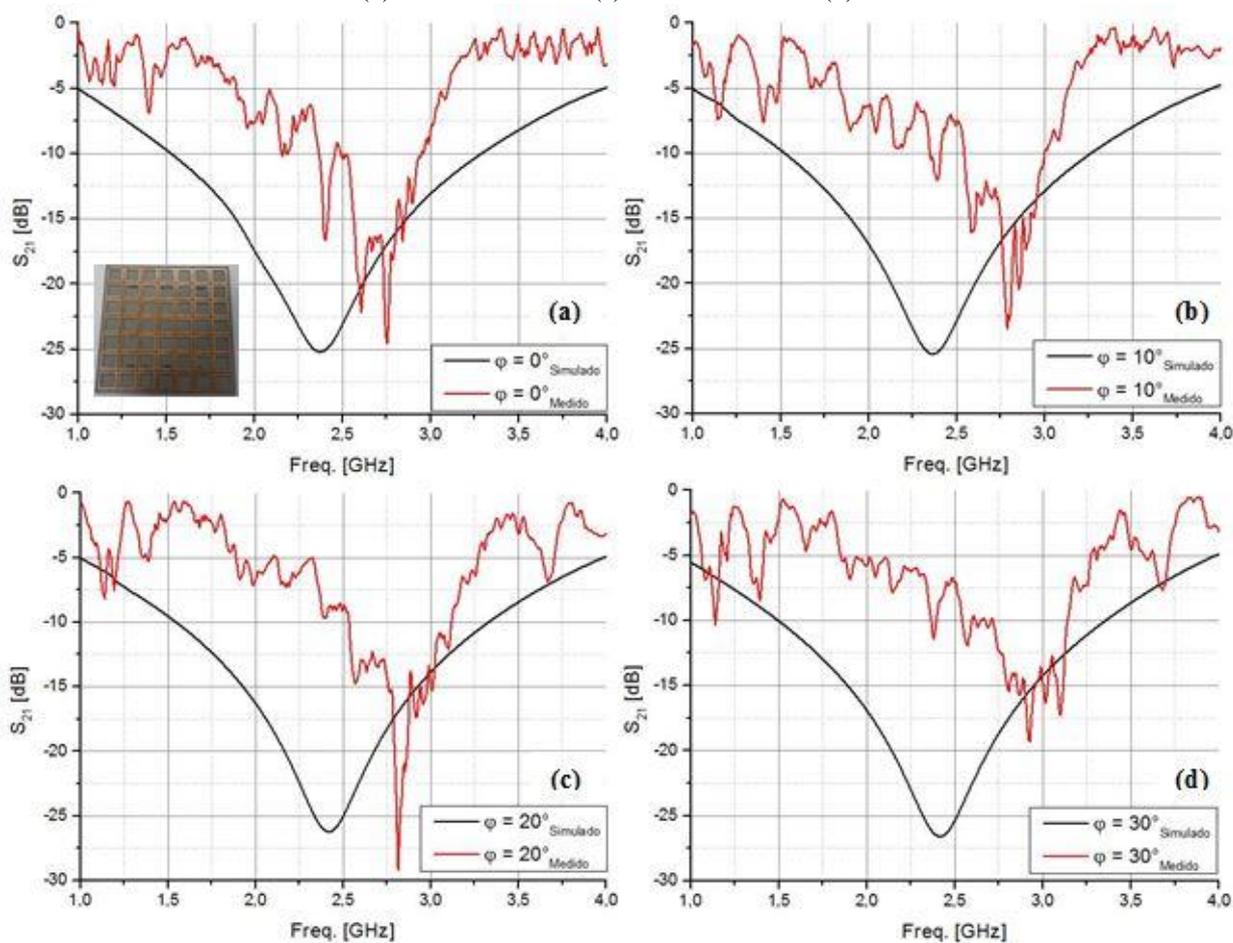
4.3 Resultados obtidos para as *FSS*

Nesta seção são apresentados os resultados experimentais obtidos na medição das *FSS*, bem como feita a discussão dos mesmos. As discussões envolvem a comparação entre os resultados simulados e medidos, análise de estabilidade angular das estruturas e o efeito do aumento da permissividade relativa do substrato de vidro nesta última.

4.3.1 Resultados obtidos para a FSS com substrato de vidro comum

A Figura 72 apresenta os resultados obtidos a partir das medições para a frequência de ressonância da FSS e a comparação com os resultados obtidos na simulação, para os ângulos de incidência analisados para a polarização vertical. O substrato utilizado foi o vidro bronze comercial em seu estado inicial, ou seja, correspondendo as amostras de código B₀.

Figura 72 – Comparação entre os resultados simulados e medidos para a FSS com substrato de vidro comum: (a) Incidência normal (b) Incidência de 10° (c) Incidência de 20° (d) Incidência de 30°.



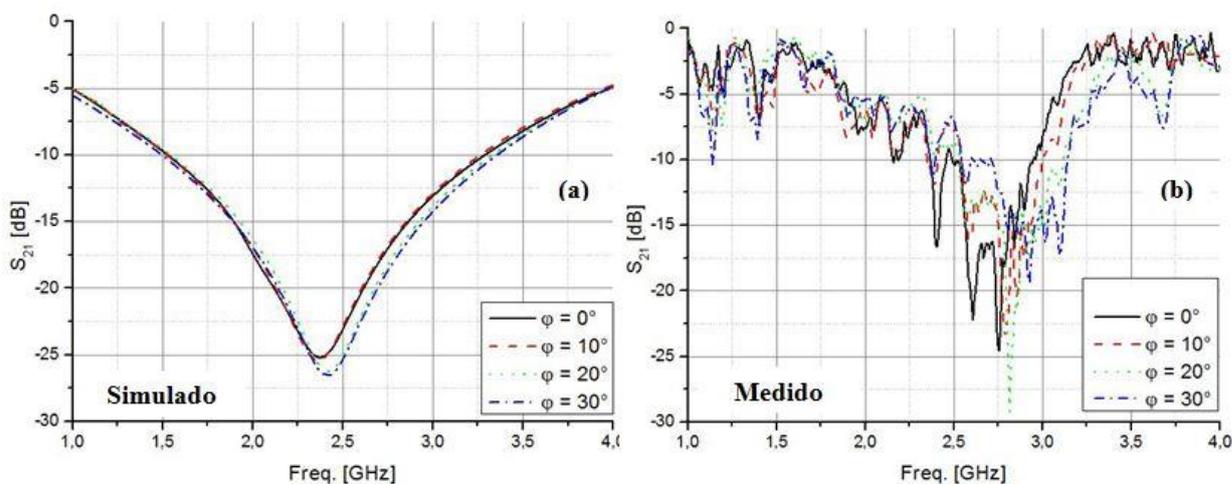
Fonte: Autor, 2021.

A Figura 72(a) apresenta a frequência de ressonância para a incidência normal, estando presente também o detalhe da FSS medida. Foi observada uma diferença de 14,11% para a frequência de ressonância medida, em relação à simulada. As Figuras 72(b), 72(c) e 72(d) apresentam os resultados obtidos para incidência oblíqua de 10°, 20° e 30°, sendo observadas diferenças de 14,94%, 16,94% e 20,25% para a frequência de ressonância medida em relação à simulada, respectivamente. As diferenças observadas entre resultados simulados e medidos podem estar relacionadas às variações observadas anteriormente para a permissividade

relativa do substrato de vidro, em diferentes áreas das amostras (GUSTAFSSON et al., 2006; DEWANI et al., 2018; LIU et al., 2020).

A Figura 73 apresenta os resultados obtidos nas simulações e medições para a análise de estabilidade angular na polarização vertical. Foi observado um aumento da frequência de ressonância com a variação do ângulo de incidência, sendo mais acentuado nas medições.

Figura 73 - Análise de estabilidade angular para polarização vertical: (a) Simulado (b) Medido.



Fonte: Autor, 2021.

A Tabela 22 apresenta um resumo numérico dos gráficos da Figura 73, sendo que a largura de banda foi obtida considerando-se o limiar de $S_{21} = -10$ dB.

Tabela 22 - Resumo numérico da análise de estabilidade angular para polarização vertical.

Ângulo de incidência	f_r (simulada/medida) [GHz]	BW (simulada/medida) [GHz]
0°	2,41/2,75	1,52/0,42
10°	2,41/2,77	1,73/0,48
20°	2,42/2,83	1,78/0,58
30°	2,42/2,91	1,85/0,52

Fonte: Autor, 2021.

Conforme apresentado na Tabela 22, a estrutura apresentou desempenho de estabilidade angular satisfatório, atuando como filtro rejeita-faixa no intervalo de 2,4000 GHz – 2,4835 GHz nas simulações. Nas medições, devido ao deslocamento observado na frequência de ressonância, a estrutura não atuou no intervalo de interesse. A Tabela 23 apresenta a razão entre o valor medido no ângulo de maior variação e a incidência normal, para os parâmetros da Tabela 22.

Tabela 23 - Razão para os parâmetros frequência de ressonância e largura de banda entre o valor no ângulo de apresentou maior variação e a incidência normal.

	$\frac{f_{r\varphi máx}}{f_{r\varphi=0^\circ}}$	$\frac{BW_{\varphi máx}}{BW_{\varphi=0^\circ}}$
Simulado	1,004	1,217
Medido	1,058	1,381

Fonte: Autor, 2021.

A partir da Tabela 23 pode-se notar que a estrutura apresentou maior sensibilidade para a variação do ângulo de incidência nas medições, em relação às simulações. A Tabela 24 apresenta as variações em MHz da frequência de ressonância com a mudança do ângulo de incidência para a polarização vertical. O sinal positivo indica um aumento da frequência de ressonância.

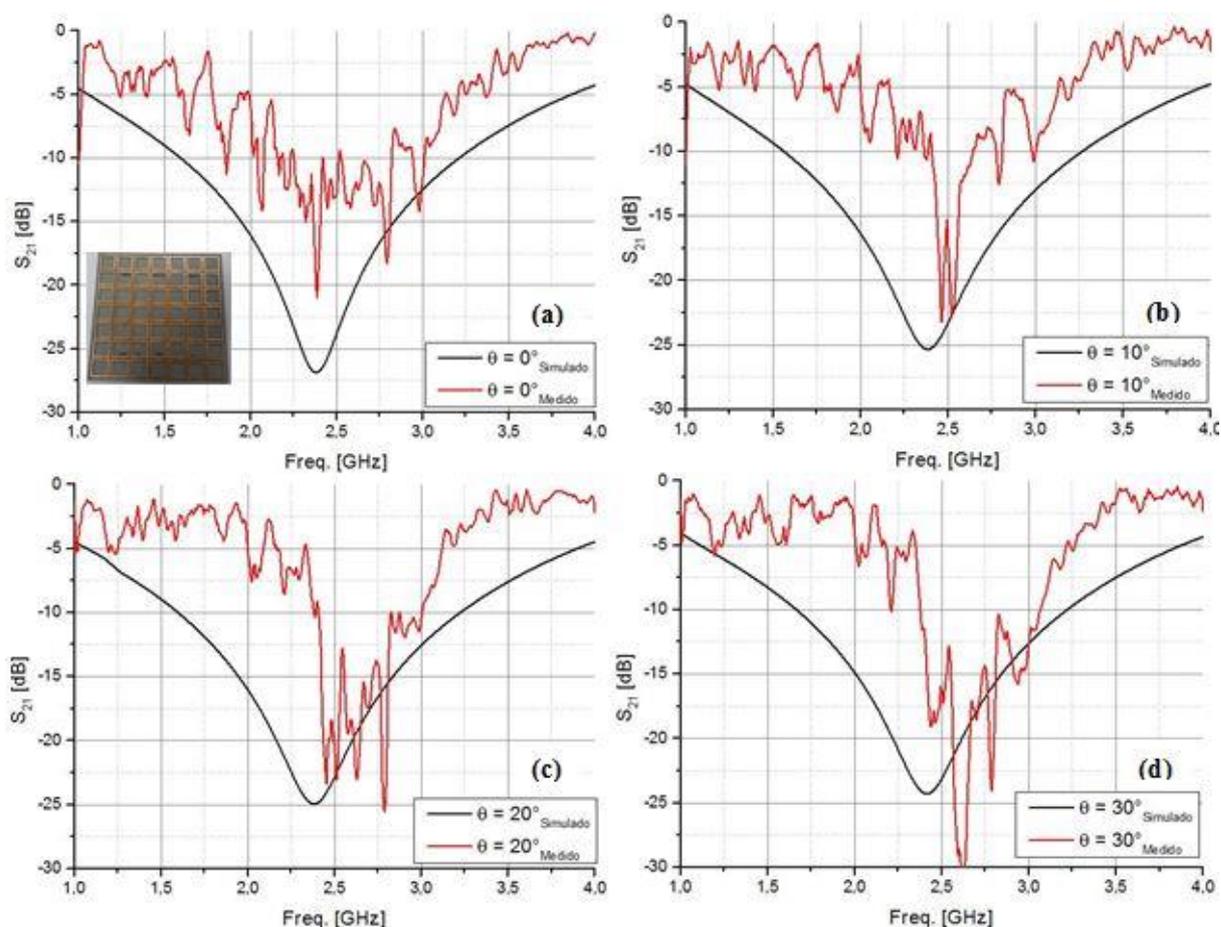
Tabela 24 - Resultados da análise de estabilidade angular para a polarização vertical.

Ângulo de incidência	Variação da frequência de ressonância (simulada/medida) [MHz]
10°	0/+20
20°	+10/+80
30°	+10/+160

Fonte: Autor, 2021.

A partir da Tabela 24 pode-se notar que a estrutura apresentou um aumento gradual em sua frequência de ressonância nas medições, com o incremento do ângulo de incidência. A Figura 74 apresenta a comparação entre os resultados simulados e medidos para a *FSS* com substrato de vidro comum, na polarização horizontal.

Figura 74 - Resultado simulado e medido para polarização horizontal: (a) Incidência normal (b) Incidência de 10° (c) Incidência de 20° (d) Incidência de 30°.

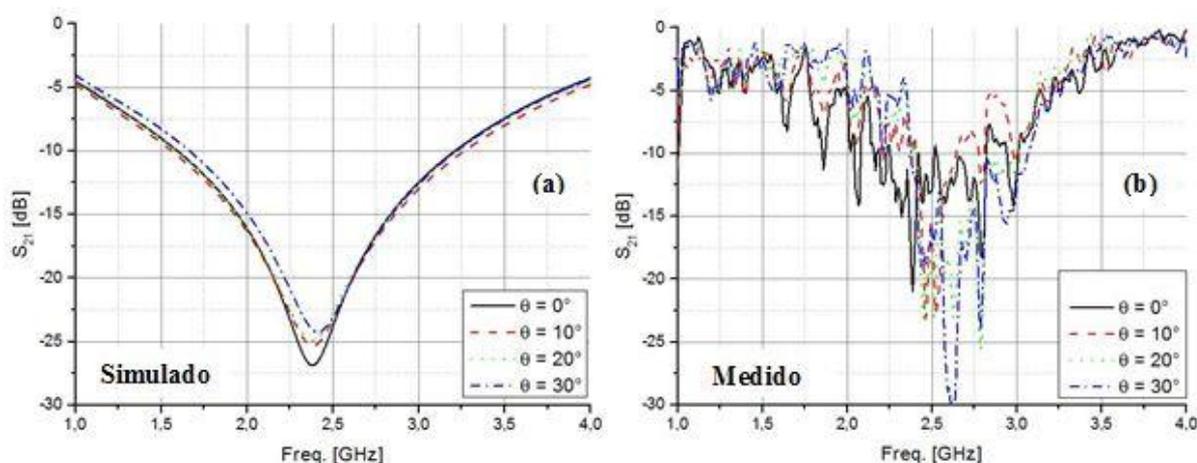


Fonte: Autor, 2021.

A Figura 74(a) apresenta o comportamento simulado e medido do coeficiente de transmissão para a incidência normal, sendo apresentada também a estrutura medida, que é a mesma apresentada na Figura 72(a). Foi observada uma diferença de 0,40% entre o resultado medido e simulado. As Figuras 74(b), 74(c) e 74(d) apresentam os resultados obtidos para incidência oblíqua de 10°, 20° e 30°, sendo observadas diferenças de 3,35%, 5,88% e 7,05% para a frequência de ressonância medida em relação à simulada, respectivamente.

A Figura 75 apresenta os resultados obtidos nas simulações e medições para a análise de estabilidade angular na polarização horizontal. Foi observado um aumento da frequência de ressonância com a variação do ângulo de incidência, sendo mais acentuado nas medições. Uma concordância maior entre resultados simulados e medidos foi observada para a polarização horizontal, quando comparada com a vertical.

Figura 75 - Análise de estabilidade angular para polarização horizontal: (a) Simulado (b) Medido.



Fonte: Autor, 2021.

A Tabela 25 apresenta um resumo numérico dos gráficos da Figura 75, sendo o intervalo de operação obtido considerando-se o limiar de $S_{21} = -10$ dB.

Tabela 25 - Dados numéricos dos gráficos da Figura 75.

Ângulo de incidência	f_r (simulada/medida) [GHz]	BW (simulada/medida) [GHz]
0°	2,38/2,39	1,61/0,63
10°	2,39/2,47	1,27/0,33
20°	2,38/2,52	1,62/0,63
30°	2,41/2,58	1,55/0,69

Fonte: Autor, 2021.

Conforme apresentado na Tabela 25, a estrutura apresentou desempenho de estabilidade angular satisfatório, atuando como filtro rejeita-faixa no intervalo de 2,4000 GHz – 2,4835 GHz nas simulações e medições. A Tabela 26 apresenta a razão entre o valor medido no ângulo de maior variação e a incidência normal, para os parâmetros da Tabela 25.

Tabela 26 - Razão para os parâmetros frequência de ressonância e largura de banda entre o valor no ângulo de apresentou maior variação e a incidência normal.

	$\frac{f_{r\theta_{m\acute{a}x}}}{f_{r\theta=0^\circ}}$	$\frac{BW_{\theta_{m\acute{a}x}}}{BW_{\theta=0^\circ}}$
Simulado	1,013	0,789
Medido	1,079	0,524

Fonte: Autor, 2021.

A partir da Tabela 26 pode-se notar que a estrutura apresentou maior sensibilidade para a variação do ângulo de incidência nas medições, em relação às simulações. A Tabela 27 apresenta as variações em MHz da frequência de ressonância com a mudança do ângulo de incidência para a polarização horizontal. O sinal positivo indica um aumento da frequência de ressonância.

Tabela 27 - Resultado da análise de estabilidade angular para a polarização horizontal.

Ângulo de incidência	Variação da frequência de ressonância (simulada/medida) [MHz]
10°	+10/+80
20°	0/+130
30°	+30/+190

Fonte: Autor, 2021.

A partir da Tabela 27 pode-se notar que a estrutura apresentou um aumento gradual em sua frequência de ressonância nas medições, com o incremento do ângulo de incidência. Na Subseção 4.3.2, são apresentados os efeitos do tratamento térmico do substrato de vidro utilizado no desempenho de estabilidade angular da *FSS*.

4.3.2 Efeitos do tratamento térmico do substrato de vidro no desempenho da *FSS*

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos no tratamento térmico do substrato de vidro e seus efeitos no desempenho de estabilidade angular da *FSS*.

4.3.2.1 Caracterização do substrato

O substrato de vidro foi tratado com as especificações de tempo e temperatura da codificação B₁. A Figura 76 apresenta o estado do substrato após o processo de tratamento térmico.

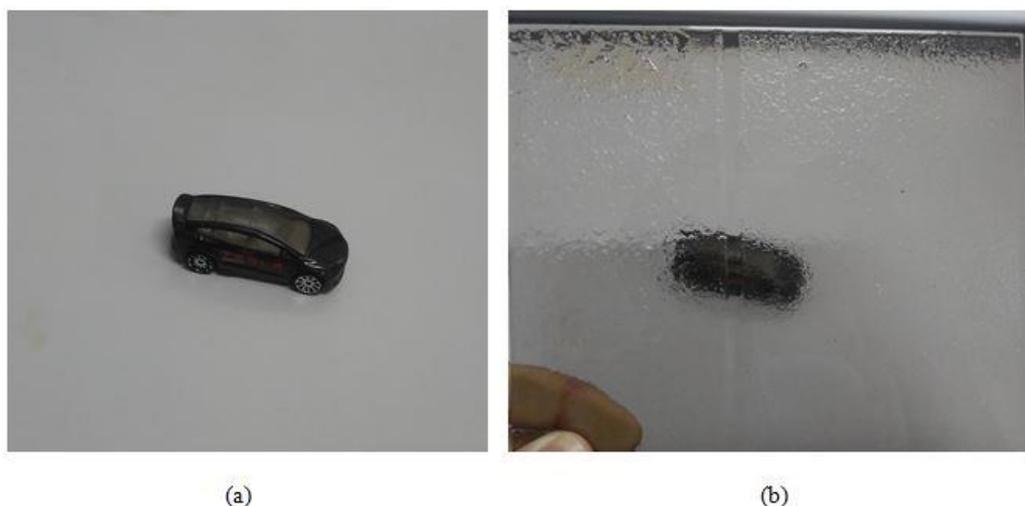
Figura 76 - Substrato de vidro tratado termicamente.



Fonte: Autor, 2021.

O vidro teve uma diminuição em sua transparência devido a deformações que surgiram em sua superfície, causadas por irregularidades na superfície dos tijolos refratários usados para apoiar o substrato no interior do forno. A Figura 77 apresenta a diminuição de transparência do substrato.

Figura 77 - Diminuição da transparência do substrato: (a) Objeto visto diretamente (b) Objeto visto através do vidro tratado.

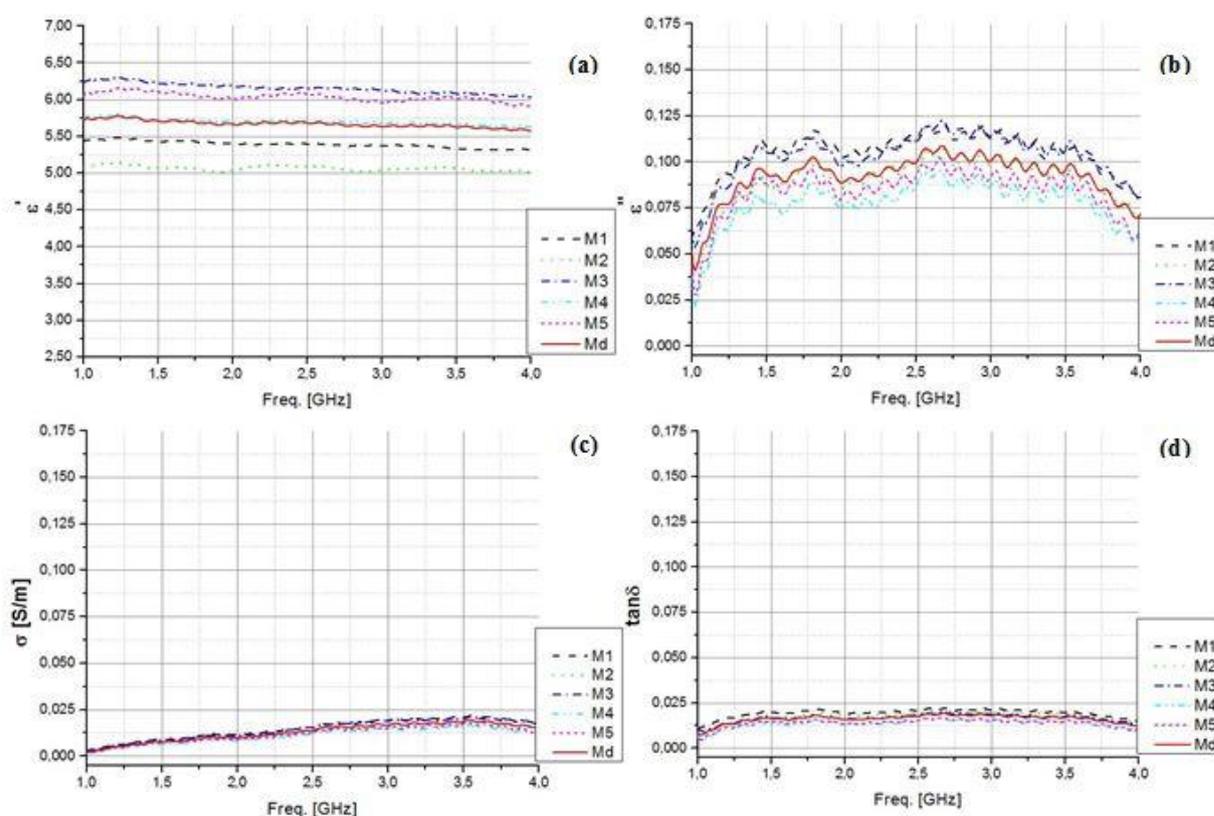


Fonte: Autor, 2021.

As deformações na superfície do substrato foram causadas pela irregularidade dos tijolos refratários utilizados como base no processo de tratamento, não sendo as mesmas observadas na amostra que passou pelo mesmo processo de tratamento, apresentada na Subseção 4.1.3.

A Figura 78 apresenta os resultados das medições para a constante dielétrica do substrato. Foram realizadas cinco medições, nomeadas de M1 a M5, em diferentes partes da amostra e tomado o valor médio, nomeado de Md. O valor médio obtido para a constante dielétrica está próximo ao obtido na Subseção 4.1.3. Foi observada uma variação nos valores obtidos nas medições, assim como observado para as demais amostras de vidro na Subseção 4.1.

Figura 78 - Efeitos do tratamento térmico nos parâmetros do substrato de vidro bronze: (a) Constante dielétrica (b) Constante de perdas (c) Condutividade (d) Tangente de perdas.



Fonte: Autor, 2021.

A condutividade apresentou um comportamento semelhante ao observado para a constante de perdas. Os valores obtidos no intervalo de 1 GHz - 4 GHz estão em concordância com os apresentados na Subseção 4.1.3. O substrato apresentou valores menores que os obtidos na Subseção 4.1.3 para o processo de tratamento utilizado. A Tabela 28 apresenta os valores médios dos parâmetros anteriores para uma frequência de 2,45 GHz, sendo os mesmos utilizados para a simulação da FSS.

Tabela 28 – Valor médio dos parâmetros eletromagnéticos do substrato tratado medidos na frequência de 2,45 GHz.

Parâmetro	ϵ'	ϵ''	σ [S/m]	$\tan\delta$	$ \epsilon_r $
Valor médio	5,61882	0,09164	0,01252	0,01628	5,61883

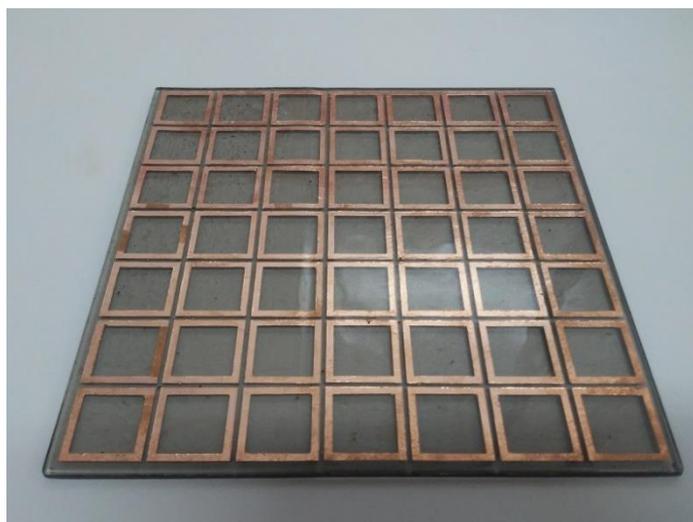
Fonte: Autor, 2021.

A Subseção 4.3.2.2 apresenta os efeitos do tratamento térmico e o aumento da permissividade relativa do substrato de vidro na frequência de ressonância e estabilidade angular da estrutura.

4.3.2.2 Efeitos do tratamento térmico na estabilidade angular e frequência de ressonância

Finalizada as medições dos parâmetros eletromagnéticos do substrato de vidro tratado termicamente, a *FSS* foi construída, sendo apresentada na Figura 79.

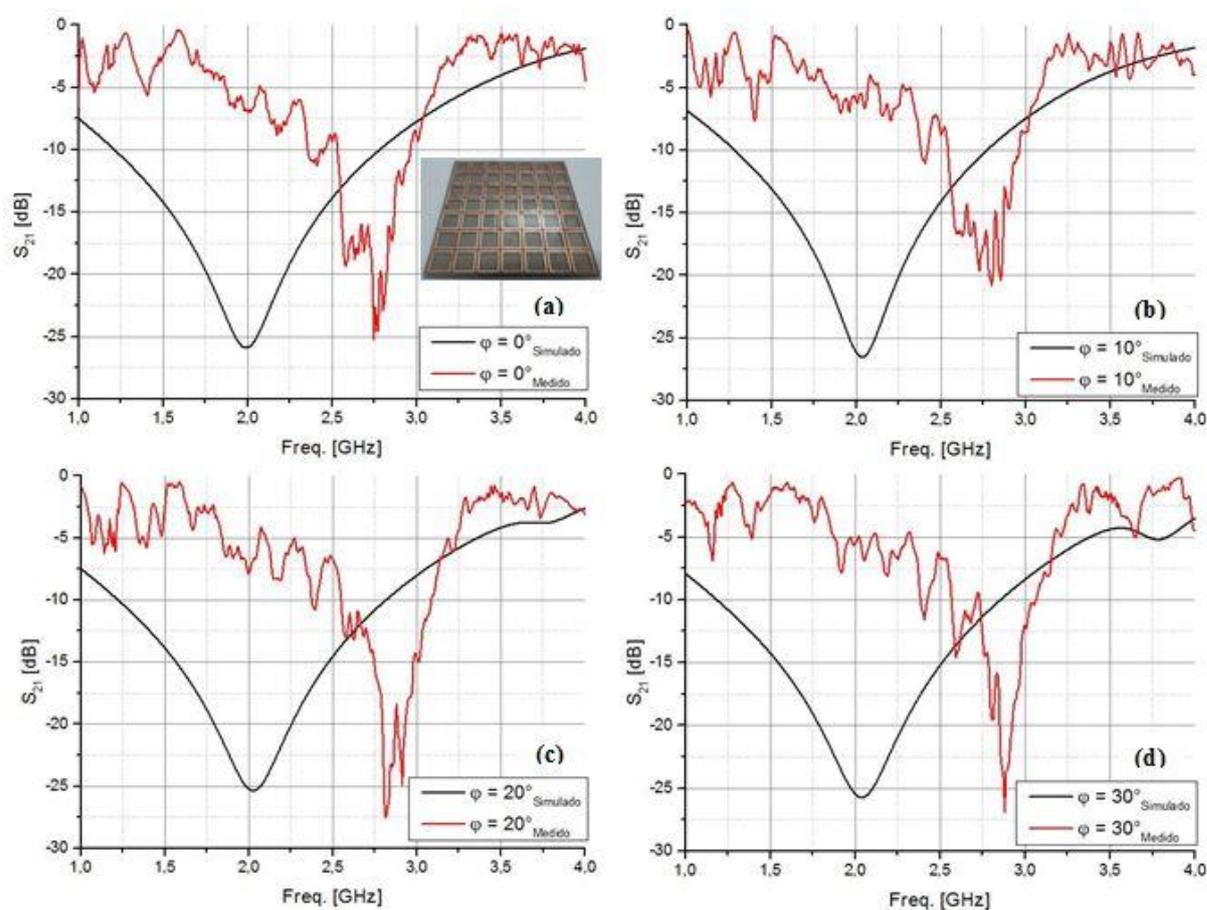
Figura 79 - *FSS* construída sobre o substrato de vidro tratado termicamente.



Fonte: Autor, 2021.

Para que somente o efeito do tratamento térmico fosse observado, a *FSS* não foi redimensionada, sendo observada variação em sua frequência de ressonância. A Figura 80 apresenta os resultados obtidos a partir das medições para a frequência de ressonância da *FSS* e a comparação com os resultados obtidos na simulação, para os ângulos de incidência analisados para a polarização vertical. O substrato utilizado foi o vidro bronze comercial tratado termicamente, ou seja, correspondendo as amostras de código B₁.

Figura 80 - Comparação entre os resultados simulados e medidos para a *FSS* com substrato de vidro comum: (a) Incidência normal (b) Incidência de 10° (c) Incidência de 20° (d) Incidência de 30° .

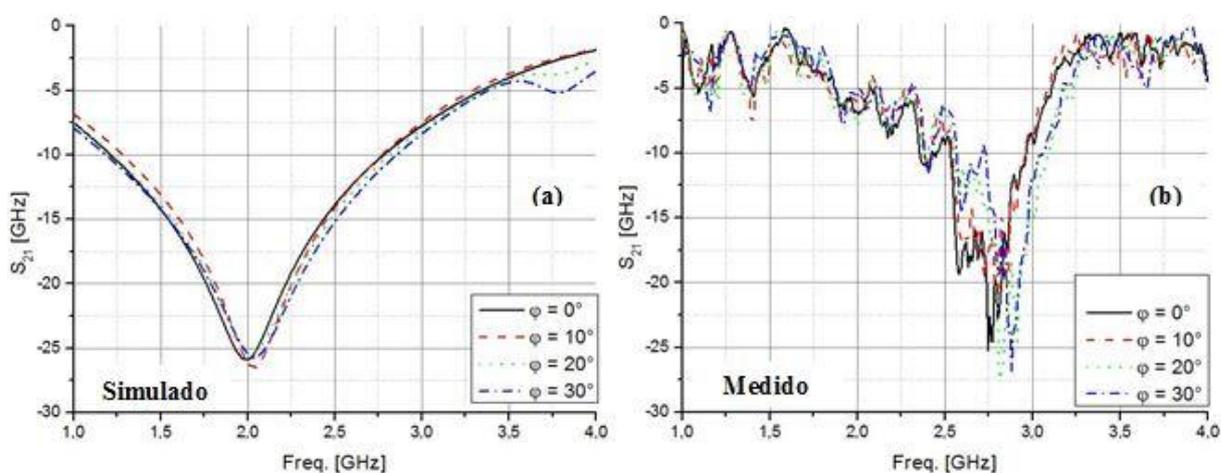


Fonte: Autor, 2021.

A Figura 80(a) apresenta a frequência de ressonância para a incidência normal, estando presente também o detalhe da *FSS* medida. Foi observada uma diferença de 38,69% para a frequência de ressonância medida, em relação à simulada. As Figuras 80(b), 80(c) e 80(d) apresentam os resultados obtidos para incidência oblíqua de 10° , 20° e 30° , sendo observadas diferenças de 37,44%, 38,92% e 40,69% para a frequência de ressonância medida em relação à simulada, respectivamente. Nas simulações foi observada uma diminuição na frequência de ressonância após o processo de tratamento térmico, porém esse comportamento não foi observado nas medições.

A Figura 81 apresenta os resultados obtidos nas simulações e medições para a análise de estabilidade angular na polarização vertical. Foi observado um aumento da frequência de ressonância com a variação do ângulo de incidência, sendo mais acentuado nas medições.

Figura 81 - Análise de estabilidade angular para polarização vertical: (a) Simulado (b) Medido.



Fonte: Autor, 2021.

A Tabela 29 apresenta um resumo numérico dos gráficos da Figura 73, sendo que a largura de banda foi obtida considerando-se o limiar de $S_{21} = -10$ dB.

Tabela 29 - Resumo numérico da análise de estabilidade angular para polarização vertical.

Ângulo de incidência	f_r (simulada/medida) [GHz]	BW (simulada/medida) [GHz]
0°	1,99/2,76	1,57/0,43
10°	2,03/2,79	1,50/0,41
20°	2,03/2,82	1,58/0,52
30°	2,04/2,87	1,85/0,49

Fonte: Autor, 2021.

Conforme apresentado na Tabela 29, a estrutura apresentou desempenho de estabilidade angular satisfatório, atuando como filtro rejeita-faixa no intervalo de 2,4000 GHz – 2,4835 GHz nas simulações, apesar do deslocamento da frequência de ressonância. Nas medições, devido ao deslocamento observado na frequência ressonância, a estrutura não atuou no intervalo de interesse. A Tabela 30 apresenta a razão entre o valor medido no ângulo de maior variação e a incidência normal, para os parâmetros da Tabela 29.

Tabela 30 - Razão para os parâmetros frequência de ressonância e largura de banda entre o valor no ângulo de apresentou maior variação e a incidência normal.

	$\frac{f_{r\varphi máx}}{f_{r\varphi=0^\circ}}$	$\frac{BW_{\varphi máx}}{BW_{\varphi=0^\circ}}$
Simulado	1,025	1,178
Medido	1,040	1,209

Fonte: Autor, 2021.

A partir da Tabela 30 pode-se notar que a estrutura apresentou maior sensibilidade para a variação do ângulo de incidência nas medições, em relação às simulações. Fazendo-se uma comparação entre as Tabelas 23 e 30, nota-se que a estrutura apresentou um melhor desempenho de estabilidade angular nas medições, após o processo de tratamento térmico. A Tabela 31 apresenta as variações em MHz da frequência de ressonância com a mudança do ângulo de incidência para a polarização vertical. O sinal positivo indica um aumento da frequência de ressonância.

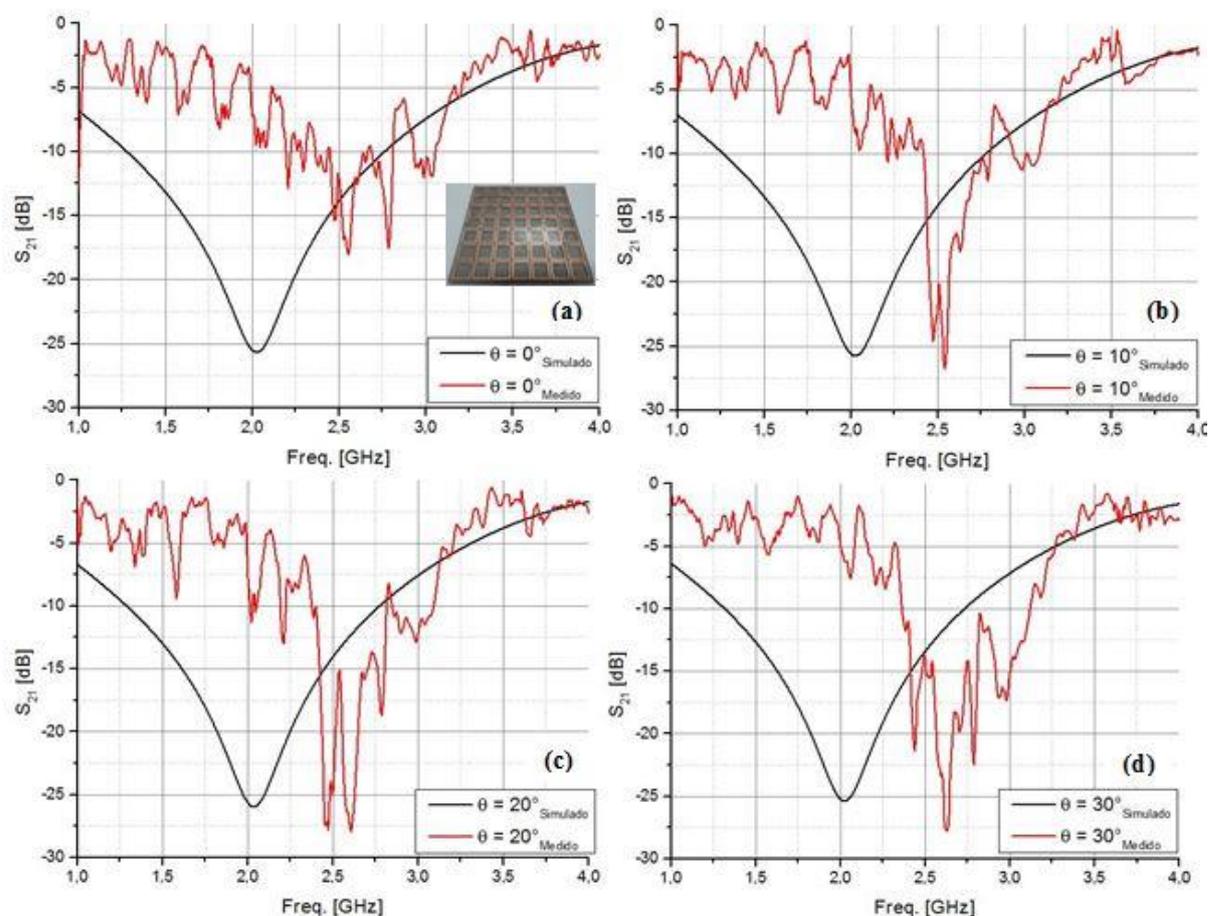
Tabela 31 - Resultados da análise de estabilidade angular para a polarização vertical.

Ângulo de incidência	Varição da frequência de ressonância (simulada/medida) [MHz]
10°	+40/+30
20°	+40/+60
30°	+50/+110

Fonte: Autor, 2021.

A partir da Tabela 31 pode-se notar que a estrutura apresentou um aumento gradual em sua frequência de ressonância nas simulações e medições, com o incremento do ângulo de incidência, mesmo após o processo de tratamento térmico. A Figura 82 apresenta a comparação entre os resultados simulados e medidos para a FSS com substrato de vidro tratado, na polarização horizontal.

Figura 82 - Resultado simulado e medido para polarização horizontal: (a) Incidência normal (b) Incidência de 10° (c) Incidência de 20° (d) Incidência de 30°.

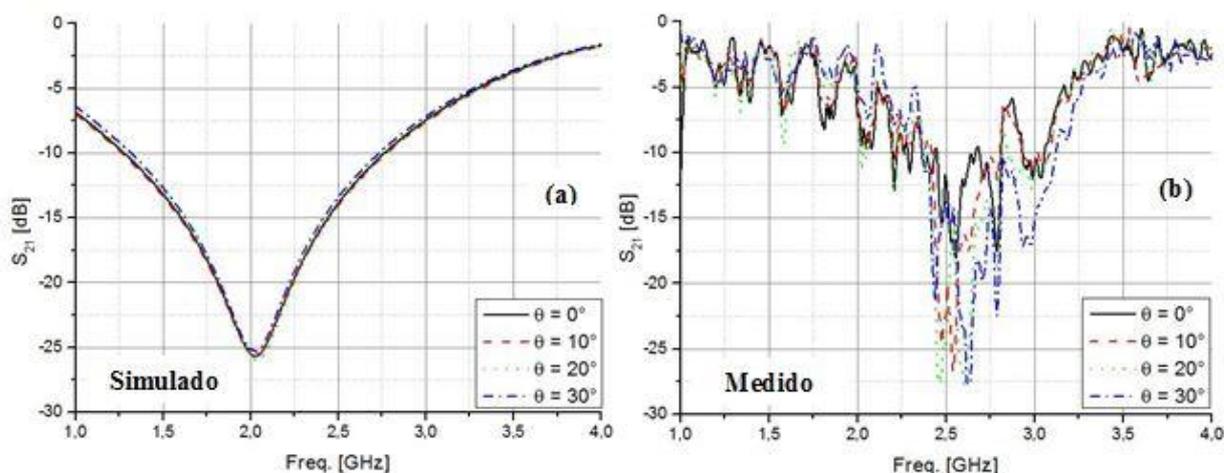


Fonte: Autor, 2021.

A Figura 82(a) apresenta o comportamento simulado e medido do coeficiente de transmissão para a incidência normal, sendo apresentada também a estrutura medida, que é a mesma apresentada na Figura 80(a). Foi observada uma diferença de 26,11% entre o resultado medido e simulado. As Figuras 82(b), 82(c) e 82(d) apresentam os resultados obtidos para incidência oblíqua de 10°, 20° e 30°, sendo observadas diferenças de 25,61%, 27,58% e 29,56% para a frequência de ressonância medida em relação à simulada, respectivamente.

A Figura 83 apresenta os resultados obtidos nas simulações e medições para a análise de estabilidade angular na polarização horizontal. Foi observado um aumento da frequência de ressonância com a variação do ângulo de incidência, ocorrendo apenas nas medições.

Figura 83 - Análise de estabilidade angular para polarização horizontal: (a) Simulado (b) Medido.



Fonte: Autor, 2021.

A Tabela 32 apresenta um resumo numérico dos gráficos da Figura 83, sendo a largura de banda obtida considerando-se o limiar de $S_{21} = -10$ dB.

Tabela 32 - Dados numéricos dos gráficos da Figura 83.

Ângulo de incidência	f_r (simulada/medida) [GHz]	BW (simulada/medida) [GHz]
0°	2,03/2,56	1,48/0,39
10°	2,03/2,55	1,50/0,37
20°	2,03/2,61	1,48/0,44
30°	2,03/2,63	1,41/0,75

Fonte: Autor, 2021.

Conforme apresentado na Tabela 32, a estrutura apresentou desempenho de estabilidade angular satisfatório, atuando como filtro rejeita-faixa no intervalo de 2,4000 GHz – 2,4835 GHz nas simulações e medições. Nas simulações não foi observada variação da frequência de ressonância com a mudança do ângulo de incidência, tendo ocorrido variação nas medições. A Tabela 33 apresenta a razão entre o valor medido no ângulo de maior variação e a incidência normal, para os parâmetros da Tabela 32.

Tabela 33 - Razão para os parâmetros frequência de ressonância e largura de banda entre o valor no ângulo de apresentou maior variação e a incidência normal.

	$\frac{f_{r\theta_{máx}}}{f_{r\theta=0^\circ}}$	$\frac{BW_{\theta_{máx}}}{BW_{\theta=0^\circ}}$
Simulado	1,000	0,953
Medido	1,027	1,923

Fonte: Autor, 2021.

A partir da Tabela 33 pode-se notar que a estrutura apresentou maior sensibilidade para a variação do ângulo de incidência nas medições, em relação às simulações. A Tabela 34 apresenta as variações em MHz da frequência de ressonância com a mudança do ângulo de incidência para a polarização horizontal. O sinal negativo indica uma diminuição da frequência de ressonância.

Tabela 34 - Resultado da análise de estabilidade angular para a polarização horizontal.

Ângulo de incidência	Variação da frequência de ressonância (simulada/medida) [MHz]
10°	0/-10
20°	0/+50
30°	0/+70

Fonte: Autor, 2021.

A partir da Tabela 34 pode-se notar que a estrutura apresentou um aumento gradual em sua frequência de ressonância nas medições, com o incremento do ângulo de incidência. A Tabela 35 apresenta uma comparação entre a razão da frequência de ressonância e largura de banda, antes e após o processo de tratamento térmico.

Tabela 35 - Razão da frequência de ressonância e largura de banda antes e após o processo de tratamento térmico.

	Vidro comum (simulada/medida)		Vidro tratado (simulada/medida)	
	$\frac{f_{r \varphi, \theta máx}}{f_{r \varphi, \theta=0^\circ}}$	$\frac{BW_{\varphi, \theta máx}}{BW_{\varphi, \theta=0^\circ}}$	$\frac{f_{r \varphi, \theta máx}}{f_{r \varphi, \theta=0^\circ}}$	$\frac{BW_{\varphi, \theta máx}}{BW_{\varphi, \theta=0^\circ}}$
Vertical	1,004/1,058	1,217/1,381	1,025/1,040	1,178/1,209
Horizontal	1,013/1,079	0,789/0,524	1,000/1,027	0,953/1,923

Fonte: Autor, 2021.

A partir da Tabela 35, pode-se notar que, foi observada nas medições, uma diminuição da variação da frequência de ressonância e largura de banda com a mudança do ângulo de incidência, após o processo de tratamento térmico do substrato. Houve apenas uma exceção para a largura de banda na polarização horizontal. A Tabela 36 apresenta uma comparação entre o desempenho de estabilidade angular da FSS, com base na variação em relação à frequência de ressonância da incidência normal, antes e após o processo de tratamento do substrato, considerando-se as polarizações vertical e horizontal.

Tabela 36 - Variação da frequência de ressonância da *FSS* em MHz antes e após o processo de tratamento térmico.

Ângulo de incidência	Vidro comum (simulada/medida)		Vidro tratado (simulada/medida)	
	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal
10°	0/+20	+10/+80	+40/+30	0/-10
20°	+10/+80	0/+130	+40/+60	0/+50
30°	+10/+160	+30/+190	+50/+110	0/+70

Fonte: Autor, 2021.

Nas simulações, para a polarização vertical, foi observado que a estrutura com substrato comum apresentou melhor desempenho de estabilidade angular do que a estrutura com substrato tratado. Nas medições foi observada uma melhora da estabilidade angular após o processo de tratamento térmico, havendo uma exceção para o ângulo de 10°. Para a polarização horizontal, tanto nas simulações quanto nas medições, foi observada uma melhora no desempenho de estabilidade angular da *FSS* após o processo de tratamento térmico do substrato.

5 CONCLUSÕES

O estudo e desenvolvimento de uma *FSS* com substrato de vidro, para melhoria da qualidade de sinal e segurança de usuários em ambientes de comunicação *indoor*, foram realizados neste trabalho. Inicialmente, foi feita uma pesquisa sobre os tipos de vidro comumente utilizados em janelas e fachadas de edificações. Foram coletadas amostras de vidro e realizadas medições dos parâmetros constante dielétrica, constante de perdas, condutividade e tangente de perdas. Por meio das medições foi observada uma falta de homogeneidade do vidro plano comercial em relação aos parâmetros medidos, obtendo-se valores diferentes em cada região da amostra.

Foi realizado um processo de tratamento térmico nas amostras de vidro, sendo verificado o efeito do mesmo nos parâmetros eletromagnéticos medidos. Após o processo de tratamento térmico, foi observado um aumento dos parâmetros eletromagnéticos medidos. O principal objetivo do processo é o aumento da permissividade relativa do substrato de vidro, devido a sua influência na estabilidade angular da *FSS*. Foi observado que para temperaturas acima de 800 °C o vidro apresenta deformação física e opacidade, devido ao processo de tratamento. Observou-se ainda que o vidro bronze apresentasse uma fase vítrea e cristalina, após um tratamento térmico de 900 °C por 180 minutos. O uso do vidro como substrato para a estrutura teve como principal dificuldade a falta de homogeneidade das propriedades eletromagnéticas medidas.

Foram construídas duas *FSS*, uma com substrato comum e outra com substrato tratado termicamente, e verificado o efeito do tratamento térmico no desempenho de estabilidade angular da estrutura. Devido à falta de homogeneidade do substrato de vidro, foi observada uma diferença entre a frequência e ressonância simulada e medida. Foi observada nas medições uma melhora no desempenho de estabilidade angular após o processo de tratamento do substrato, com exceção para o ângulo de incidência de 10° na polarização vertical. Com base nos resultados obtidos por meio de simulações e medições, conclui-se que o processo de tratamento térmico do substrato de vidro, promove um melhor desempenho de estabilidade angular para a *FSS* construída sobre o mesmo. Vale ressaltar que, neste trabalho, a melhora foi obtida para uma estrutura com elemento de espira quadrada, sendo conhecida por ser um elemento que possui uma estabilidade angular satisfatória. É necessária a realização de um novo estudo antes de estender o resultado obtido para outros elementos.

A *FSS* proposta apresentou desempenho satisfatório, com aplicabilidade para a melhoria da qualidade do sinal e segurança de usuários de redes *WLAN*. O redimensionamento da estrutura permite que a mesma opere como filtro rejeita-faixa no intervalo de frequência desejado. O estudo realizado sobre o substrato de vidro, bem como os efeitos do processo de tratamento térmico no mesmo, tem o potencial de auxiliar trabalhos futuros de estruturas com substrato de vidro.

6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base no trabalho desenvolvido são feitas as seguintes recomendações de trabalhos futuros:

- Realizar o estudo dos efeitos do tratamento térmico nas propriedades eletromagnéticas de amostras de vidro que contenham óxidos metálicos em sua composição;
- Realizar o estudo dos efeitos do aumento da permissividade relativa do substrato na estabilidade angular, considerando-se frequências mais elevadas;
- Realizar o estudo e o desenvolvimento de FSS utilizando-se outros materiais que constituem os ambientes de comunicação indoor como substrato, tais como papel de parede, madeira e concreto.
- Realizar um estudo para verificar se o processo de tratamento térmico do substrato promove uma melhora de estabilidade angular de FSS compostas por elementos que não apresentem tal característica.

REFERÊNCIAS

AKERMAN, M.. **Natureza Estrutura e Propriedades do Vidro**, CETEV (Centro Técnico de Elaboração do Vidro), 2000. Disponível em: http://www.dimensaodigital.com.br/ufpr/cf361/vidro_SaintGobain.pdf. Acesso em: 24 out. 2020.

ALMEIDA FILHO, Valdez Aragão de. **Aplicação de superfícies seletivas em frequência para melhoria de desempenho de antenas tipo banda dupla**. 2014. 93 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

ARAÚJO, Lincoln Machado de. **Caracterização de superfícies seletivas de frequência de periódicas e não-periódicas**. 2014. 81 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

ASAADI, Muftah; AFIFI, Islam; SEBAK, Abdel-Raik. High Gain and Wideband High Dense Dielectric Patch Antenna Using FSS Superstrate for Millimeter-Wave Applications. **IEEE Access**, [S.L.], v. 6, n. [], p. 38243-38250, 30 jul. 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/access.2018.2854225>.

BABISK, Michelle Pereira. **Desenvolvimento de vidros sodo-cálcicos a partir de resíduos de rochas ornamentais**. 2009. 90 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Mestrado em Ciência dos Materiais. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro 2009. Disponível em: http://www.ime.eb.mil.br/arquivos/teses/se4/cm/MICHELLE_P_BABISK.pdf. Acesso em: 24 out. 2020.

BALANIS, Constantine A. **Antenna theory: Analysis and design**. 3 ed. New Jersey: United States: Wiley, 2005. 1073 p. ISBN 0-471-66782-X.

BANSAL, Narottam P.; DOREMUS, Robert H.. **Handbook of Glass Properties**. [S.L.]: Elsevier, 2013. 680 p. ISBN 9780080523767.

BARAZANI, Bruno. **Investigações sobre a sinterização de sílica vítrea por plasma pulsado**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Controle e Automação Mecânica) - Escola Politécnica, University of São Paulo, São Paulo, 2011. doi:10.11606/D.3.2011.tde-04112011-143427. Acesso em: 2020-11-26.

BARRERA, Mario Alberto Rodríguez. **Modelo de permissividade efetiva do dielétrico para o método do circuito equivalente em superfícies seletivas em frequência do tipo loop quadrado**. 2015. 213 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

BELIN, R. Ion dynamics in superionic chalcogenide glasses: complete conductivity spectra. **Solid State Ionics**, [S.L.], v. 136-137, n. 1-2, p. 1025-1029, 2 nov. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0167-2738\(00\)00556-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0167-2738(00)00556-7). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167273800005567>. Acesso em: 27 out. 2020.

BOUGHRIET, A.-H.; LEGRAND, C.; CHAPOTON, A.. Noniterative stable transmission/reflection method for low-loss material complex permittivity determination. **IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques**, [S.L.], v. 45, n. 1, p. 52-57, fev. 1997. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/22.552032>. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/552032?casa_token=IOyJKbpdC3QAAAAA:OuQojr1TU5pbt17sUwvmt0pAJn7zddlQ8eVExeGVbwI4qLc3ijk4Dg7-OxTj6De60rU1K_xcsHE. Acesso em: 28 nov. 2020.

BURNIER, Luc *et al.* Energy saving glazing with a wide band-pass FSS allowing mobile communication: up-scaling and characterisation. **Iet Microwaves, Antennas & Propagation**, [S.L.], v. 11, n. 10, p. 1449-1455, 16 ago. 2017. Institution of Engineering and Technology (IET). <http://dx.doi.org/10.1049/iet-map.2016.0685>. Disponível em: <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-map.2016.0685>. Acesso em: 06 nov. 2020.

CALLISTER JUNIOR, William D.. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 5. ed. [S.L.]: Wiley, 2000. 620 p.

CAMPOS, Antonio. **Superfícies seletivas em frequência: análise e projeto**. Natal: Ifrn Editora, 2009. 196 p.

CARTER, C. B.; NORTON, M. G.. **Ceramic materials**. Berlin: Springer Verlag, 2007.

CEBRACE. **Enciclopédia do vidro**. Disponível em: <http://www.cebrace.com.br/#!/enciclopedia/interna/a-composicao-do-vidro>. Acesso em: 26 out. 2020.

CHEN, Chao-Chun. Transmission of Microwave Through Perforated Flat Plates of Finite Thickness. **IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques**, [S.L.], v. 21, n. 1, p. 1-6, jan. 1973. DOI: 10.1109/TMTT.1973.1127906. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1127906>. Acesso em: 21 out. 2020.

CHEN, L. F.; ONG, C. K.; NEO, C. P.; VARADAN, V. V.; VARADAN, V. K. **Microwaves electronics: Measurement and materials characterization**. [S.L.]: Wiley, 2004. 553 p. ISBN 0-470-84492-2.

CONTE, Francisco Genaro Raposo. **Análise de implantação de uma fábrica de vidros planos no Nordeste do Brasil com a aplicação da teoria das opções reais**. 2011. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Economia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011. Disponível em: <https://attena.ufpe.br/handle/123456789/4633>. Acesso em: 27 nov. 2020.

DEWANI, Aliya A.; O'KEEFE, Steven G.; THIEL, David V.; GALEHDAR, Amir. Window RF Shielding Film Using Printed FSS. **IEEE Transactions On Antennas And Propagation**, [S.L.], v. 66, n. 2, p. 790-796, fev. 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tap.2017.2780893>.

ELZWAWI, Ghada Hussain; KESAVAN, Arun; ALWAHISHI, Rabeia; DENIDNI, Tayeb A.. A New Corner-Reflector Antenna With Tunable Gain Based on Active Frequency Selective Surfaces. **IEEE Open Journal Of Antennas And Propagation**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 88-94, 6 mar. 2020. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/ojap.2020.2979053>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9026869>. Acesso em: 23 out. 2020.

ESCANHOELA JR, Carlos Augusto. **Condutividade elétrica e polarização térmica de vidros soda-cal-sílica contendo diferentes cátions tetravalentes**. 2011. 92 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Física. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2011. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/91918/escanhoelajunior_ca_me_rcla.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 27 out. 2020.

EULER, M; FUSCO, V; CAHILL, R; DICKIE, R. 325 GHz Single Layer Sub-Millimeter Wave FSS Based Split Slot Ring Linear to Circular Polarization Converter. **IEEE Transactions On Antennas And Propagation**, [S.L.], v. 58, n. 7, p. 2457-2459, jul. 2010.

Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
<http://dx.doi.org/10.1109/tap.2010.2048874>. Disponível em:
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5454305>. Acesso em: 20 nov. 2020.

FAROOQ, Umer; SHAFIQUE, Muhammad Farhan; MUGHAL, Muhammad Junaid. Polarization Insensitive Dual Band Frequency Selective Surface for RF Shielding Through Glass Windows. **IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility**, [S.L.], v. 62, n. 1, p. 93-100, fev. 2020. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
<http://dx.doi.org/10.1109/temc.2019.2893408>. Disponível em:
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8640242>. Acesso em: 06 nov. 2020.

FERNANDES, Elidiane Mirella Farias. **Aplicação de superfície seletiva em frequência para melhoria de desempenho de sistemas de antenas banda dupla**. 2016. 116 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal Fluminense, Niterói 2016.

FERREIRA, Ana Elisa Leitão Alonso; MOLANO ORTIZ, Fernando ; COSTA, Luis Henrique Maciel Kosmalski. Avaliação de Tecnologias de Comunicação Sem-Fio para Monitoramento em Ambientes de Floresta. *In: ANAIS PRINCIPAIS DO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES E SISTEMAS DISTRIBUÍDOS (SBRC)*, 37. , 2019, Gramado. **Anais [...]**. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2019 . p. 113-126. ISSN 2177-9384. DOI: <https://doi.org/10.5753/sbrc.2019.7354>.

FIORIO, Vivian. **Como criar sua própria rede Wi-Fi sem roteador**. 2014. Disponível em:
<https://www.techtudo.com.br/dicas-e-tutoriais/noticia/2011/04/aprenda-como-criar-sua-propria-rede-wi-fi-sem-roteador.html>. Acesso em: 28 nov. 2020.

GHODGAONKAR, D.K.; VARADAN, V.V.; VARADAN, V.K.. A free-space method for measurement of dielectric constants and loss tangents at microwave frequencies. **IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement**, [S.L.], v. 38, n. 3, p. 789-793, jun. 1989. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
<http://dx.doi.org/10.1109/19.32194>. Disponível em:
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/32194>. Acesso em: 04 nov. 2020.

GHODGAONKAR, D.K.; VARADAN, V.V.; VARADAN, V.K.. Free-space measurement of complex permittivity and complex permeability of magnetic materials at microwave frequencies. **IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement**, [S.L.], v. 39, n. 2,

p. 387-394, abr. 1990. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/19.52520>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/52520>. Acesso em: 04 nov. 2020.

GHOSH, Saptarshi; SRIVASTAVA, Kumar Vaibhav. An Equivalent Circuit Model of FSS-Based Metamaterial Absorber Using Coupled Line Theory. **IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters**, [S.L.], v. 14, n. 1, p. 511-514, 2015. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/lawp.2014.2369732>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6954430>. Acesso em: 21 nov. 2020.

GOMES NETO, Alfredo; SILVA, Jefferson Costa e; BARBOZA, Amanda Gomes; COUTINHO, Ianes Barbosa Grécia; ALENCAR, Marina de Oliveira; ANDRADE, Mylenna Correia de. Modeling the Resonant Behavior of Continuously Reconfigurable FSS Based on Four Arms Star Geometry. **Journal Of Microwaves, Optoelectronics And Electromagnetic Applications**, [S.L.], v. 19, n. 3, p. 415-427, set. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/2179-10742020v19i3930>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jmoea/a/ZcrZLy7sw4P8whk533vP9TP/abstract/?lang=en#>. Acesso em: 27 out. 2021.

GOSWAMI, M.; DESHPANDE, S.K.; KUMAR, R.; KOTHIYAL, G.P. Electrical behaviour of Li₂O–ZnO–SiO₂ glass and glass-ceramics system. **Journal Of Physics And Chemistry Of Solids**, [S.L.], v. 71, n. 5, p. 739-744, maio 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpcs.2010.01.014>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022369710000156>. Acesso em: 30 out. 2020.

GUSTAFSSON, M.; KARLSSON, A.; REBELO, A.P.P.; WIDENBERG, B.. Design of Frequency Selective Windows for Improved Indoor Outdoor Communication. **IEEE Transactions On Antennas And Propagation**, [S.L.], v. 54, n. 6, p. 1897-1900, jun. 2006. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tap.2006.875926>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1638391>. Acesso em: 20 nov. 2020.

HABIB, Shahid; KIANI, Ghaffer Iqbal; BUTT, Muhammad Fasih Uddin. A Convolted Frequency Selective Surface for Wideband Communication Applications. **IEEE Access**,

[S.L.], v. 7, n. 1, p. 65075-65082, maio 2019. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/access.2019.2916882>.

HONG, Tao; XING, Wenbo; ZHAO, Qiang; GU, Yue; GONG, Shuxi. Single-Layer Frequency Selective Surface With Angular Stability Property. **IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters**, [S.L.], v. 17, n. 4, p. 547-550, abr. 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/lawp.2018.2801864>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8281107>. Acesso em: 23 nov. 2020.

IEEE. **IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks—Specific requirements - Part 11: wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications. IEEE Std**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 1-3534, dez. 2016. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/ieeestd.2016.7786995>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7786995>. Acesso em: 02 nov. 2020.

ITOU, Akihiko; HASHIMOTO, Osamu; YOKOKAWA, Hidehiro; SUMI, Kazutoshi. A fundamental study of a thin $\lambda/4$ wave absorber using FSS technology. **Electronics And Communications In Japan (Part I: Communications)**, [S.L.], v. 87, n. 11, p. 77-86, 2004. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/ecja.10180>.

KALACHEV, A.A.; KUKOLEV, I.V.; MATITSIN, S.M.; NOVOGRUDSKIY, L.N.; ROZANOV, K.N.; SARYCHEV, A.K.; SELEZNEV, A.V.. The Methods of Investigation of Complex Dielectric Permittivity of Layer Polymers Containing Conductive Inclusions. **Mrs Proceedings**, [S.L.], v. 214, n. 1, p. 119-124, fev. 1990. Cambridge University Press (CUP). <http://dx.doi.org/10.1557/proc-214-119>. Disponível em: <https://encurtador.com.br/oyNR2>. Acesso em: 03 nov. 2020.

KAUR, Amandeep; KHANNA, Atul; GONZÁLEZ, Fernando; PESQUERA, Carmen; CHEN, Banghao. Structural, optical, dielectric and thermal properties of molybdenum tellurite and borotellurite glasses. **Journal Of Non-Crystalline Solids**, [S.L.], v. 444, n. 15, p. 1-10, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2016.04.033>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022309316301363>. Acesso em: 30 out. 2020.

KIANI, G.I.; WEILY, A.R.; ESSELLE, K.P. A novel absorb/transmit FSS for secure indoor wireless networks with reduced multipath fading. **IEEE Microwave And Wireless**

Components Letters, [S.L.], v. 16, n. 6, p. 378-380, jun. 2006. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/Imwc.2006.875589>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1637501>. Acesso em: 19 nov. 2020.

KIANI, Ghaffer I.; ALDHAHERI, Rabah W.. Wide band FSS for increased thermal and communication efficiency in smart buildings. **2014 IEEE Antennas And Propagation Society International Symposium (Apsursi)**, [S.L.], p. 1-3, jul. 2014. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/aps.2014.6905359>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6905359>. Acesso em: 06 nov. 2020.

KINGERY, W. David; BOWEN, H. K.; UHLMANN, Donald R.. **Introduction to Ceramics**. 2. ed. [S.L.]: Wiley, 1976. 1056 p. ISBN 9780471478607.

KLEIN, Cornelis; DUTROW, Barbara. **Manual de Ciência dos Minerais**. 23. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012. 716 p. Tradução de Rualdo Menegat. ISBN 978-85-7780-963-0.

LANGLEY, R.J.; PARKER, E.A.. Equivalent circuit model for arrays of square loops. **Electronics Letters**, [S.L.], v. 18, n. 7, p. 294, 1982. Institution of Engineering and Technology (IET). <http://dx.doi.org/10.1049/el:19820201>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4249659>. Acesso em: 23 out. 2020.

LEE, Shung-Wu; ZARRILLO, G.; LAW, Chak-Lam. Simple formulas for transmission through periodic metal grids or plates. **IEEE Transactions On Antennas And Propagation**, [S.L.], v. 30, n. 5, p. 904-909, set. 1982. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tap.1982.1142923>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1142923>. Acesso em: 21 out. 2020.

LI, Mei; XIAO, Shaoqiu; BAI, Yan-Ying; WANG, Bing-Zhong. An Ultrathin and Broadband Radar Absorber Using Resistive FSS. **IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters**, [S. L.], v. 11, n. 1, p. 748-751, jul. 2012. doi: 10.1109/LWAP.2012.2206361.

LI, Tian-Wu; LI, Da; LI, Er-Ping. A novel FSS structure with high selectivity and excellent angular stability for 5G communication radome. In: 2017 10TH GLOBAL SYMPOSIUM ON MILLIMETER-WAVES, 10., 2017, Hong Kong: IEEE, 2017. p. 50-52.

LIU, Bing; NIE, Zai-Ping; TAN, Jun. Study of finite planar frequency selective surfaces based on Babinet principle. **2016 Progress In Electromagnetic Research Symposium (Piers)**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 4137-4141, ago. 2016. IEEE.

<http://dx.doi.org/10.1109/piers.2016.7735553>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7735553>. Acesso em: 21 nov. 2020.

LIU, Ning; SHENG, Xianjun; ZHANG, Chunbo; FAN, Jingjing; GUO, Dongming. A Design Method for Synthesizing Wideband Band-Stop FSS via Its Equivalent Circuit Model. **IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters**, [S.L.], v. 16, n. 1, p. 2721-2725, ago. 2017. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/lawp.2017.2743114>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8014441>. Acesso em: 23 nov. 2020.

LIU, Xiaochun; TAN, Weihua; SHEN, Zhongxiang; JIN, Cheng. Integrated Frequency-Selective Surface and Antenna Printed on a Transparent Substrate. **IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters**, [S.L.], p. 2062-2066, set. 2020. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/lawp.2020.3022436>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9188015>. Acesso em: 24 nov. 2020.

LUUKKONEN, Olli; SIMOVSKI, Constantin; GRANET, Gérard; GOUSSETIS, George; LIOUBTCHENKO, Dmitri; RAISANEN, Antti V.; TRETYAKOV, Sergei A.. Simple and Accurate Analytical Model of Planar Grids and High-Impedance Surfaces Comprising Metal Strips or Patches. **IEEE Transactions On Antennas And Propagation**, [S.L.], v. 56, n. 6, p. 1624-1632, jun. 2008. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tap.2008.923327>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4538157>. Acesso em: 23 nov. 2020.

LUUKKONEN, O.; COSTA, F.; SIMOVSKI, C. R.; MONORCHIO, A.; TRETYAKOV, S. A.. A thin electromagnetic absorber for wide incidence angles and both polarizations. **IEEE Transaction On Antennas And Propagation**, [S. L.], v. 57, n. 10, p. 3119-3125, out. 2009. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5175447>. Acesso em: 19 nov. 2020.

MARCUVITZ, N.. **Waveguide Handbook**. Toronto: McGraw-Hill, 1951. Disponível em: <https://archive.org/details/WaveguideHandbook/page/n5/mode/2up>. Acesso em: 22 jul. 2020.

MARQUES, Caio Marcelo. **Relação entre microestrutura e desgaste erosivo a frio e a quente em materiais cerâmicos à base de alumina**. 2006. 170 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. Disponível em:

<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/8140/000568891.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 25 nov. 2020.

MARTIESSEN, Werner. WARLIMONT, Hans. **Handbook of condensed matter and materials data**. 1 ed. Berlin, Germany: Springer, 2005. 1143 p. ISBN 3-540-44376-2.

MARTINS, Sílvia de Castro. **Rotas de concentração por flotação para a wollastonita presente no depósito do estado de Goiás**. 2015. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <https://ppgem.eng.ufmg.br/defesas/2295M.PDF>. Acesso em: 25 nov. 2020.

MCSPADDEN, J.O.; YOO, T.; CHANG, K.. Theoretical and experimental investigation of a rectenna element for microwave power transmission. **IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques**, [S.L.], v. 40, n. 12, p. 2359-2366, dez. 1992. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/22.179902>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/179902>. Acesso em: 04 nov. 2020.

MITTRA, R.; CHAN, C.H.; CWIK, T.. Techniques for analyzing frequency selective surfaces-a review. **Proceedings Of The IEEE**, [S.L.], v. 76, n. 12, p. 1593-1615, dez. 1988. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/5.16352>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/16352>. Acesso em: 03 nov. 2020.

MONTANO, Paulo Fernandes; BASTOS, Hugo. A indústria de vidro plano: conjuntura atual e perspectivas. **Bnds Setorial**, Rio de Janeiro, v. 38, n. 1, p. 265-290, set. 2013. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/4801>. Acesso em: 27 nov. 2020.

MORAIS, Márcio de Carvalho. **Uma análise comparativa do padrão IEEE 802.11 operando em 2,4 GHz e em 900 MHz**. 2011. Disponível em: http://www.dsc.ufcg.edu.br/~pet/jornal/setembro2011/materias/pesquisas_dsc.html. Acesso em: 13 nov. 2020.

MORSI, Reham M.M.; BASHA, Mohammad A.F.. Effect of heat-treatment on the electrical and dielectric properties of a TiO₂-containing lithia-calcia-silica glass and glass ceramics. **Materials Chemistry And Physics**, [S.L.], v. 129, n. 3, p. 1233-1239, out. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2011.06.017>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0254058411005347>. Acesso em: 28 out. 2020.

MOSIG, Juan R.; BESSON, Jean-Claude E.; GEX-FABRY, Marianne; GARDIOL, Fred E.. Reflection of an open-ended coaxial line and application to nondestructive measurement of materials. **IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement**, [S.L.], v. -30, n. 1, p. 46-51, mar. 1981. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tim.1981.6312437>. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6312437?casa_token=a7J0zMvWMBgAAAAA:391rdd68dd5eexFP20ijGA_BIZVx41DL_jTXhvy_DK1paHQVqHBoZsdEsDA3-ZOicXOe7OJxkjA. Acesso em: 03 jul. 2021.

MOURA, Leidiane Carolina Martins de. **Caracterização de FSS com geometria estrela de quatro braços**. 2015. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa, 2015.

MUNK, Ben A. **Frequency Selective Surfaces: Theory and Design**. 3 ed. New York, United States: Wiley-Blackwell, 2000. 440 p. ISBN 978-0471370475.

MUNZ, Dietrich; FETT, Theo. **Ceramics: Mechanical properties, failure behavior, materials selection**. 2. ed. New York: Springer, 2001. ISBN 3-540-65376-7.

NAPOLITANO, Olívio da Conceição. **Estudo de viabilidade para utilização da tecnologia wireless no monitoramento de condições operacionais de motores em usinas operações**. 2019. 94 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Nuclear, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2019.

NARAYAN, Shiv; JHA, Rakesh Mohan. Electromagnetic Techniques and Design Strategies for FSS Structure Applications [Antenna Applications Corner]. **IEEE Antennas And Propagation Magazine**, [S.L.], v. 57, n. 5, p. 135-158, out. 2015. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/map.2015.2474867>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7327346>. Acesso em: 21 nov. 2020.

NASCIMENTO, Marcio Luiz Ferreira. **Condutividade elétrica de vidros boratos, silicatos e sílico-sulfatos de íons-alcalinos**. 2000. 207 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Mestrado em Física. Instituto de Física da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

NEWBOLD, A.. Designing buildings for the wireless age [FSS]. **Communications Engineer**, [S.L.], v. 2, n. 3, p. 18-21, 1 jun. 2004. Institution of Engineering and Technology (IET). <http://dx.doi.org/10.1049/ce:20040303>. Disponível em: https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ce_20040303. Acesso em: 19 nov. 2020.

NÓBREGA, Clarissa de Lucena. **Análise e projeto de superfícies seletivas de frequência com geometria pré-fractais para aplicações em comunicações indoor**. 2013. 144 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e da Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/15218/1/ClarissaLN_TESE.pdf. Acesso em: 19 nov. 2020.

NOTAROS, Branislav M. **Eletromagnetismo**. 1 ed. [S.I.], Brasil: Pearson, 2011. 606 p. ISBN 978-85-645-7426-7.

OLIVEIRA, Elder Eldervitch Carneiro de. **Antenas de microfita com *patch* quase-fractal para aplicações em redes WPAN/WLAN**. 2008. 125 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal 2008.

PAKDIN, Mahdi; GHAYEKHLOO, Alireza; REZAIE, Pejman; AFSABI, Majid. Transparent dual band Wi-Fi filter for double glazed energy saving window as a smart network. **Microwave And Optical Technology Letters**, [S.L.], v. 61, n. 11, p. 2545-2550, 25 jun. 2019. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/mop.31916>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/mop.31916>. Acesso em: 06 nov. 2020.

PALANGE, Anil Kumar; SONKER, Anuradha; YADAV, Shivendra Singh. Designing of multiband frequency selective surfaces. **2016 International Conference On Communication And Signal Processing (Iccsp)**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 491-494, abr. 2016. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/iccsp.2016.7754185>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7754185>. Acesso em: 02 dez. 2020.

QASEM, Nidal; SEAGER, Rob. Frequency selective wall for enhancing wireless signal in indoor environments. **2009 Loughborough Antennas & Propagation Conference**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 573-576, nov. 2009. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/lapc.2009.5352395>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5352395>. Acesso em: 23 out. 2020.

QASEM, Nidal. **Enhance Wireless Communication System Performance Through Modified Indoor Environments**. 2012. 198 f. Tese (Doutorado) - Curso de Electronic, Electrical And Systems Engineering, Loughborough University, [S.L.], 2012. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/288378804.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2020.

RANI, Saroj; SANGHI, Sujata; AHLAWAT, Neetu; AGARWAL, Ashish. Influence of Bi₂O₃ on thermal, structural and dielectric properties of lithium zinc bismuth borate glasses. **Journal Of Alloys And Compounds**, [S.L.], v. 597, n. 1, p. 110-118, jun. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.01.211>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092583881400276X>. Acesso em: 30 out. 2020.

RAPPAPORT, T. S. **Wireless communications: Principles and practice**. 2 ed. New Jersey, United States: Prentice Hall PTR, 2002. 652 p. ISBN 0-13-042232-0. Disponível em: <http://ee.sharif.edu/~wireless.comm.net/references/Rappaport%20-%20Wireless%20Communications,Principles%20and%20Practice-ISBN%200130422320.pdf>. Acesso em: 30 out. 2020.

REDKOV, A.V.; MELEHIN, V.G.; RASKHODCHIKOV, D.V.; RESHETOV, I.V.; TAGANTSEV, D.K.; ZHURIKHINA, V.V.; LIPOVSKII, A.A.. Modifications of poled silicate glasses under heat treatment. **Journal Of Non-Crystalline Solids**, [S.L.], v. 503-504, n. 2, p. 279-283, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.10.011>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022309318305891>. Acesso em: 30 out. 2020.

RIBEIRO, Dionísio Raony de Sousa. **Análise de propagação de ondas eletromagnéticas na faixa de micro-ondas em ambientes *indoor* com o método 3D FDTD e FDTD 2D modificado**. 2012. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém 2012. Disponível em: http://repositorio.ufpa.br/jspui/bitstream/2011/9242/1/Dissertacao_AnalisePropagacaoOndas.pdf. Acesso em: 03 out. 2020.

RISSMAN, Jeffrey; KENNAN, Hallie. **Low Emissivity Windows**. 2013. Disponível em: <https://energyinnovation.org/wp-content/uploads/2014/06/low-e-windows-case-study.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2020.

ROCHOL, Juergen. **Sistemas de comunicação sem fio: Conceitos e Aplicações**. 1 ed. [S.L.]: Bookman, 2018. 500 p. ISBN 9788582604564. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt->

[BR&lr=&id=QD1NDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR1&dq=comunica%C3%A7%C3%A3o+sem+fio&ots=vd1p1HkKgD&sig=T2mQXDNmSMm4txMF2RtxfwWSWWg#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-). Acesso em: 30 out. 2020.

ROSA, Sérgio Eduardo Silveira da; COSENZA, José Paulo; BARROSO, Deise Vilela. Considerações sobre a indústria do vidro no Brasil. **Bnds Setorial**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 1, p. 101-137, set. 2007. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2666>. Acesso em: 27 nov. 2020.

SAMPAIO, Juraci Aparecido. **Preparação e caracterização de vidros aluminato de cálcio com baixa concentração de sílica dopados com Nd₂O₃ e Er₂O₃**. 2001. 176 f. Tese (Doutorado) – Física Aplicada. Instituto de Física de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos 2001. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/76/76132/tde-24062008-162022/publico/JuraciSampaio_D.pdf. Acesso em: 24 out. 2020.

SANTOS, Wiliam J. Caracterização de vidros planos transparentes comerciais. **Scientia Plena**. [S.L.]. v. 5, n. 1, p. 1-5. Fev. 2009. Disponível em: <https://scientiaplena.emnuvens.com.br/sp/article/view/625/286>. Acesso em: 26 out. 2020.

SAVIA, S.B.; PARKER, E.A.. Equivalent circuit model for superdense linear dipole FSS. **IEEE Proceedings - Microwaves, Antennas And Propagation**, [S.L.], v. 150, n. 1, p. 37-42, fev. 2003. Institution of Engineering and Technology (IET). <http://dx.doi.org/10.1049/ip-map:20030107>. Disponível em: https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-map_20030107. Acesso em: 21 nov. 2020.

SEARA DA CIÊNCIA. **Jardins de silicato**. 2014. Disponível em: <https://seara.ufc.br/pt/sugestoes-para-feira-de-ciencias/sugestoes-de-quimica/jardins-de-silicato/>. Acesso em: 25 nov. 2020.

SEGUNDO, Francisco Carlos Gurgel da Silva. **Análise e projeto de superfícies seletivas de frequência multibanda e/ou banda larga**. 2014. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

SEMAN, F. C.; KHALID, N. K.. Investigations on fractal square loop FSS at oblique incidence for GSM applications. **2014 Electrical Power, Electronics, Communications, Control And Informatics Seminar (Eeccis)**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 62-66, ago. 2014. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/eeccis.2014.7003720>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7003720>. Acesso em: 20 nov. 2020.

SEYBOLD, John S. **Introduction to RF propagation**. 1 ed. New Jersey, United States: Wiley, 2005. 349 p. ISBN 978-0-471-65596-1. Disponível em: <http://www.iqytechnicalcollege.com/EE%20625%20Radio%20Wave%20Propagation.pdf>. Acesso em: 30 out. 2020.

SHAKER, Jafar; CHAHARMIR, Reza; LEGAY, Herve. Investigation of FSS-Backed Reflectarray Using Different Classes of Cell Elements. **IEEE Transactions On Antennas And Propagation**, [S.L.], v. 56, n. 12, p. 3700-3706, dez. 2008. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tap.2008.2007365>.

SHIBATA, Kouji; KOBAYASHI, Masaki. Measurement of complex permittivity for liquids using the coaxial line reflection method. **2015 Asia-Pacific Symposium On Electromagnetic Compatibility (Apemc)**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 452-455, maio 2015. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/apemc.2015.7175237>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7175237>. Acesso em: 03 nov. 2020.

SILVA, André Nascimento da. **Caracterização de FSS com geometria em forma de U**. 2014. 95 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Instituto de Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa, 2014.

SILVA, Maurício Weber Benjó da. **Superfícies seletivas em frequência – FSS: Concepção e projeto de absorvedores planares de micro-ondas para aplicação em WLAN, WiMAX e radar**. 2014. 150 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas 2014.

SILVA FILHO, Hawson Virgílio Honório e. **Superfície seletiva em frequência multibanda baseada na geometria cruz de Jerusalém**. 2018. 80 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife 2018.

SIVASAMY, Ramprabhu; KANAGASABAI, Malathi. A Novel Dual-Band Angular Independent FSS With Closely Spaced Frequency Response. **IEEE Microwave And**

Wireless Components Letters, [S.L.], v. 25, n. 5, p. 298-300, maio 2015. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/lmwc.2015.2410591>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7079525>. Acesso em: 23 nov. 2020.

SOHAIL, Syed Irfan; ESSELLE, Karu P.; KIANI; Ghaffer. Design of a bandpass FSS on dual layer energy saving glass for improved RF communication in modern buildings. **Proceedings Of The 2012 IEEE International Symposium On Antennas And Propagation**, [S.L.], v., n, p. 1-2, jul. 2012. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/aps.2012.6348600>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6348600>. Acesso em: 06 nov. 2020.

SOLTANI, Shaghayegh; TAYLOR, Paul S.; PARKER, Edward A.; BATCHELOR, John C.. Pop-up Tunable Frequency Selective Surfaces for Strain Sensing. **IEEE Sensors Letters**, [S.L.], v. 4, n. 4, p. 1-4, abr. 2020. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/lsens.2020.2983685>.

SONG, Hyok J.; SCHAFFNER, James H.; SON, Kyung A.; MOON, Jeong S.. Optically transparent Ku-band silver nanowire frequency selective surface on glass substrate. **2014 IEEE Antennas And Propagation Society International Symposium (Apsursi)**, [S.L.], v, n, p. 1-2, jul. 2014. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/aps.2014.6905377>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6905377>. Acesso em: 06 nov. 2020.

STUCHLY, Maria A.; STUCHLY, Stanislaw S.. Coaxial Line Reflection Methods for Measuring Dielectric Properties of Biological Substances at Radio and Microwave Frequencies-A Review. **IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement**, [S.L.], v. 29, n. 3, p. 176-183, set. 1980. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tim.1980.4314902>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4314902>. Acesso em: 03 nov. 2020.

TI, Eth Soluções em. **IEEE 802.11: conheça as diferenças entre o b/g/n e o a/n/ac**. 2020. Disponível em: <https://blog.ethi.com.br/ieee-802-11-conheca-as-diferencas-entre-o-b-g-n-e-o-a-n-ac/>. Acesso em: 12 jan. 2022.

ULLAH, Irfan *et al.* Transmission improvement of UMTS and Wi-Fi signals through energy saving glass using FSS. **Wamicon 2011 Conference Proceedings**, [S.L.], v, n, p. 1-5, abr. 2011. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/wamicon.2011.5872858>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5872858>. Acesso em: 06 nov. 2020.

ULRICH, R.. Far-infrared properties of metallic mesh and its complementary structure. **Infrared Physics**, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 37-55, mar. 1967. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0020-0891\(67\)90028-0](http://dx.doi.org/10.1016/0020-0891(67)90028-0). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0020089167900280>. Acesso em: 21 out. 2020.

UMARI, M.H. *et al.* A free-space bistatic calibration technique for the measurement of parallel and perpendicular reflection coefficients of planar samples. **IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement**, [S.L.], v. 40, n. 1, p. 19-24, fev. 1991. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/19.69942>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/69942>. Acesso em: 03 nov. 2020.

VARKANI, Ali Ramezani; FIROUZEH, Zaker Hossein; NEZHAD, Abolghasem Zeidaabadi. Equivalent circuit model for array of circular loop FSS structures at oblique angles of incidence. **Iet Microwaves, Antennas & Propagation**, [S.L.], v. 12, n. 5, p. 749-755, 18 abr. 2018. Institution of Engineering and Technology (IET). <http://dx.doi.org/10.1049/iet-map.2017.1004>.

VIGIL, Gene; XU, Zhenghe; STEINBERGE, Suzi; ISRAELACHVILI, Jacob. Interactions of Silica Surfaces. **Journal Of Colloid And Interface Science**, [S.L.], v. 165, n. 2, p. 367-385, jul. 1994. Doi: 10.1006/jcis.1994.1242. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0021979784712422>. Acesso em: 26 nov. 2020.

WESTPHAL, Fernando Simon. **Manual técnico do vidro plano para edificações**. 1 ed. [S.L.]: Simplissimo Livros, 2016. 184 p. ISBN 9788595130135.

XIONG, Xiong *et al.* WiFi band-stop FSS for increased privacy protection in smart building. **2015 IEEE 6Th International Symposium On Microwave, Antenna, Propagation, And Emc Technologies (Mape)**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 826-828, out. 2015. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/mape.2015.7510446>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7510446>. Acesso em: 26 set. 2020.

XU, Xiaoxiong; WEN, Zhaoyin; YANG, Xuelin; ZHANG, Jingchao; GU, Zhonghua. High lithium ion conductivity glass-ceramics in Li₂O–Al₂O₃–TiO₂–P₂O₅ from nanoscaled glassy powders by mechanical milling. **Elsevier**, [S.L.], v. 177, n. 32, p. 2611-2615, out. 2006.

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167273806002384>. Acesso em: 27 out. 2020.

YACOUB, Michel Daoud. **Wireless technology: protocols, standards and techniques**. 1 ed. [S. L.]: CRC press 2017. 568 p. ISBN 9781351836012. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=g3umDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT23&dq=wireless+technology&ots=zP1E3gRpvq&sig=qzh8kDRxm-35_9mVm0Otzm_3MDg#v=onepage&q=wireless%20technology&f=false. Acesso em: 16 out. 2020.

ZHAO, Lei; LIANG, Xinhua; CHEN, Zhao-Min; LI, Yuan; ZHANG, Shengjun; MA, Hongyu; SHEN, Xiaopeng. An Ultraminiaturized Dual-Stopband Frequency Selective Surface for Ultra High Frequency. **IEEE Access**, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 44830-44835, mar. 2020. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/access.2020.2978217>.

ZHANG, Pei; LI, Xinghua; YANG, Jianfeng; XU, Shaochun. Effect of heat treatment on the microstructure and properties of lithium disilicate glass-ceramics. **Journal Of Non-Crystalline Solids**, [S.L.], v. 402, p. 101-105, out. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2014.05.023>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022309314002555>. Acesso em: 28 out. 2020.