



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Estudo sobre a influência da porosidade no potencial de atenuação eletromagnético de compósitos magnéticos a base de ferrocarbonila e silicone, em tecnologias 5G, na faixa de frequência referente a Banda K (18-26,5 GHz) e Ka (26,5-40).

Thiago Ferreira Claudiano

Relatório das Atividades
Desenvolvidas, orientada pelo Dr. Chen
Ying An, e pelo Me. Bráulio Haruo
Kondo Lopes.

URL do documento original:

<XXXXX>

INPE
São José dos Campos
2024

RESUMO

A implantação do 5G trouxe consigo inúmeros benefícios, incluindo maior velocidade de conexão, menor latência e capacidade de suportar uma ampla gama de aplicações. No entanto, também tem gerado preocupações em relação à poluição eletromagnética e seus possíveis impactos na saúde e no meio ambiente. O 5G opera em frequências mais altas, sendo na frequência de 26GHz, faixa de ondas milimétricas, o que resulta em ondas eletromagnéticas com menor capacidade de penetração em comparação com tecnologias de redes anteriores com maior potencial de transmissão de dados. Para garantir uma cobertura eficaz, torna-se necessário o aumento do número de antenas e estações de base, o que, por sua vez, amplia a exposição a campos eletromagnéticos. A poluição eletromagnética refere-se à esta exposição e embora os níveis de radiação não ionizante emitidos por essas fontes sejam considerados seguros de acordo com muitos órgãos reguladores, a exposição constante e crescente a essas emissões tem gerado preocupações sobre seus potenciais efeitos a longo prazo. Neste contexto, a demanda por materiais absorvedores de radiação eletromagnética tem aumentado significativamente à medida que as redes 5G e outras tecnologias de comunicação sem fio se expandem. Esses materiais são projetados para absorver e dissipar a energia das ondas eletromagnéticas, contribuindo para reduzir a exposição a campos eletromagnéticos em áreas onde a densidade de antenas e dispositivos de comunicação é alta. A aplicação eficaz de materiais absorvedores de radiação pode contribuir para uma convivência mais segura e eficiente com a crescente complexidade das redes de comunicação. Os compósitos a base de aditivos magnéticos e elétricos dispersos em matrizes de polímeros dielétricos que além de diminuir a energia das radiações, possuem baixo peso e boa processabilidade. Estes materiais podem ser constituídos a base de carbono, ferrita, negro de fumo, óxido de grafeno, fibras de carbono e polímero, unidos a algum filtro magnético e dielétrico. O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de compósitos porosos, a base de aditivos magnéticos e elétricos, dispersos em uma matriz de silicone. Foram produzidas amostras com particulados de ferro carbonila (FC). A proporção de FC foi determinada três concentrações variando de 50%, 60% e 70% em peso dos particulados em todas as amostras. A caracterização eletromagnética foi realizada através de

um Analisador de Rede Vetorial e guia de onda retangular modelo WR42 e WR28, e a faixa de frequência analisada foi de 18 a 26,5 GHz, referente a banda K, e em referência a banda Ka foram de 26,5 a 40 GHz. Foi possível produzir amostras com 50%, 60% e 70% demonstrando a eficiência na geração de poros e seu possível controle para a metodologia adotada. Os próximos passos do presente trabalho serão a caracterização eletromagnética das amostras sem poro e o estudo do potencial de atenuação das amostras.

Palavras-chave: Materiais absorvedores de radiação eletromagnética. Banda K. Banda Ka. Material compósito.

ABSTRACT

The deployment of 5G has brought with it numerous benefits, including higher connection speeds, lower latency and the ability to support a wide range of applications. However, it has also raised concerns regarding electromagnetic pollution and its possible impacts on health and the environment. 5G operates at higher frequencies, being the 26GHz frequency, millimeter wave band, which results in electromagnetic waves with lower penetration capacity compared to previous network technologies with greater data transmission potential. To ensure effective coverage, it is necessary to increase the number of antennas and base stations, which, in turn, increases exposure to electromagnetic fields. Electromagnetic pollution refers to this exposure and although the levels of non-ionizing radiation emitted by these sources are considered safe according to many regulatory bodies, the constant and increasing exposure to these emissions has raised concerns about their potential long-term effects. In this context, the demand for electromagnetic radiation-absorbing materials has increased significantly as 5G networks and other wireless communication technologies expand. These materials are designed to absorb and dissipate the energy from electromagnetic waves, contributing to reducing exposure in areas with high antenna and communication device density. The effective application of radiation-absorbing materials can contribute to a safer and more efficient coexistence with the growing complexity of communication networks. Composite materials with magnetic and electrical additives dispersed in dielectric polymer matrices have been developed to decrease electromagnetic radiation while having low weight and good processability. These materials can be composed of carbon, ferrite, carbon black, graphene oxide, carbon fibers, and polymer, combined with some magnetic and dielectric filters. The present work aims to develop porous composites, based on magnetic and electrical additives, dispersed in a silicone matrix. Samples with iron carbonyl (FC) particulates were produced. The proportion of FC was determined at three concentrations ranging from 50%, 60% and 70% by weight of particulates in all samples. The electromagnetic characterization was carried out using a Vector Network Analyzer and rectangular waveguide model WR42 and WR28, and the frequency range analyzed was 18 to 26.5 GHz, referring to the K band, and in

reference to the Ka band they were 26.5 at 40 GHz. It was possible to produce samples with 50%, 60% and 70% demonstrating the efficiency in generating pores and their possible control for the adopted methodology. The next steps of the present work will be the electromagnetic characterization of the poreless samples and the study of the attenuation potential of the samples.

Keywords: Electromagnetic Radiation Absorbing Materials. K-band. Ka-band. Composite material.

LISTA DE FIGURAS

	PÁG.
Figura 2.1 - Processo de purificação da Ferrocarbonila	17
Figura 2.2 - Estrutura cúbica de corpo centrado referente a estrutura da ferrocarbonila	18
Figura 3.1 - Materiais para desenvolvimento das amostras, (a) Ferrocarbonila, (b) Silicone Branco e (c) Balança Analítica.....	19
Tabela 3.1 - Variação da pressão do vácuo.....	20
Tabela 3.2 - Variação da porcentagem em massa e volume de ferrocarbonila.	20
Figura 3.2 - Sistema de aplicação de vácuo.....	21
Figura 3.3 Moldes de amostras.	22
Figura 3.1 - Etapas dos processamentos de amostras.	22
Figura 3.2 - (a) Analisador de Rede Vetorial e (b) Kit da banda K.....	24
Figura 3.3 - Representação esquemática dos sinais referentes ao parâmetro S dentro de um guia de onda.....	26
Tabela 4.1 - Relação entre amostras e pressão.....	27
Figura 4.1 - Foto das amostras da Banda K e Ka, nas concentrações de (a) 50%, (b) 60%, e (c) 70% de FC.....	27
Figura 4.2 - Parcela real da permissividade elétrica na banda K das concentrações de (a) 50%, (b) 60% e (c) 70% FC.	29
Figura 4.3 - Parcela imaginária da permissividade elétrica na banda K das concentrações de (a) 50%, (b) 60% e (c) 70% FC.	30
Figura 4.4 - Parcela real da permeabilidade magnética na banda K das concentrações de (a) 50%, (b) 60% e (c) 70% FC.	31
Figura 4.5 - Parcela imaginária da permeabilidade magnética na banda K das concentrações de (a) 50%, (b) 60% e (c) 70% FC.	32
Figura 4.6 - Parcela real da permissividade elétrica na banda Ka das concentrações de (a) 50%, (b) 60% e (c) 70% FC.	33
Figura 4.7 - Parcela imaginária da permissividade elétrica na banda Ka das concentrações de (a) 50%, (b) 60% e (c) 70% FC.	34
Figura 4.8 - Parcela real da permeabilidade magnética na banda Ka das concentrações de (a) 50%, (b) 60% e (c) 70% FC.	35

Figura 4.9 - Parcela imaginária da permeabilidade magnética na banda Ka das concentrações de (a) 50%, (b) 60% e (c) 70% FC.	36
Figura 4.10 - Tangente de perda	37
Figura 4.11 – Variação ART na banda K da amostra de 50% de FC	39
Figura 4.12 - Variação ART na banda K da amostra de 60% de FC	40
Figura 4.13 - Variação ART na banda K da amostra de 70% de FC	41
Figura 4.14 - Variação ART na banda Ka da amostra de 50% de FC	42
Figura 4.15 - Variação ART na banda Ka da amostra de 60% de FC	43
Figura 4.16 - Variação ART na banda Ka da amostra de 70% de FC	44
Figura 5.1 - Refletividade das amostras com concentrações de FC de 50% (a), 60% (b) e 70% (c) para a banda Ka.	46
Figura 5.2 - Refletividade das amostras com concentrações de FC de 50% (a), 60% (b) e 70% (c) para a banda K.	47
Tabela 5.1 - Melhores resultados obtidos	48
Figura 5.3 - Esquema de amostra com poros e amostra sem poros.	48

LISTA DE TABELAS

	PÁG.
Tabela 3.1 - Variação da pressão do vácuo.....	20
Tabela 3.2 - Variação da porcentagem em massa e volume de ferrocarbonila.	20
Tabela 4.1 - Relação entre amostras e pressão.	27
Tabela 5.1 - Melhores resultados obtidos	48

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MARE	Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética
NRW	Modelo matemático Nicholson Ross Weir
FC	Ferrocarbonila
VNA	Vector Network Analyzer – Analizador de Redes Vetorial

LISTA DE SÍMBOLOS

μ	Permeabilidade magnética complexa
μ'	Parcela capacitiva da permeabilidade magnética
μ''	Parcela dissipativa da permeabilidade magnética
ε	Permissividade elétrica complexa
ε'	Parcela capacitiva da permissividade elétrica
ε''	Parcela dissipativa da permissividade elétrica
S_{ij}	Parâmetro S
η_{in}	Impedância Intrínseca
$\tan \delta_\varepsilon$	Tangente de perda elétrica
$\tan \delta_\mu$	Tangente de perda magnética
E_i	Energia incidente
E_r	Energia refletida
t	Espessura
c	Velocidade da luz

Sumário

	PÁG.
1 INTRODUÇÃO	15
2 FUNDAMENTAÇÃO	16
2.1 Ferrocarbonila	16
2.2 Borracha de silicone	18
3 METODOLOGIA	19
3.1 Desenvolvimento das amostras com poros.....	19
3.2 Caracterização eletromagnética.....	23
3.3 Ensaio de refletividade.....	23
3.4 Propriedades eletromagnéticas.....	24
3.5 Caracterização do comportamento eletromagnético	25
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
4.1 Desenvolvimento de amostras porosas com concentração de 50%, 60% e 70% de FC.....	26
4.2 Caracterização Eletromagnética	28
4.3 Absorbância, Refletância e Transmitância	38
4.3.1 Banda K	39
4.3.2 Banda Ka	42
5 ENSAIO DE REFLETIVIDADE	45
6 CONCLUSÃO	49

1 INTRODUÇÃO

O rápido avanço das tecnologias relacionadas ao 5G está fortemente ligado à sua capacidade de transmissão de dados devido as novas gerações de comunicações. O grande número de antenas que operam simultaneamente gera níveis de ruídos eletromagnéticos nunca vistos (WU et al., 2023). Tais quais são a causa da conhecida como poluição eletromagnética, e pode causar o mau funcionamento de vários tipos de sistemas e malefícios a saúde humana. A fim de reduzir este fenômeno, é possível encontrar na literatura diversos estudos sobre o desenvolvimento de materiais absorvedores de radiações eletromagnéticas (MARE), estes materiais são utilizados como mecanismo de proteção contra a poluição. Entre os materiais utilizados como MARE, é possível destacar materiais com determinados índices de porosidade, com a justificativa de que a região dos poros contribui para otimizar o potencial de atenuação (YU et al., 2024).

A implantação do 5G, a quinta geração de tecnologia de comunicação móvel, trouxe consigo inúmeros benefícios, incluindo maior velocidade de conexão, menor latência e capacidade de suportar uma ampla gama de aplicações, como a Internet das Coisas (IoT) e carros autônomos. No entanto, também tem suscitado preocupações em relação à poluição eletromagnética e seus possíveis impactos na saúde e no meio ambiente. O 5G opera em frequências mais altas, sendo na frequência de 26GHz, faixa de ondas milimétricas, o que resulta em ondas eletromagnéticas com menor capacidade de penetração em comparação com tecnologias de redes anteriores com maior potencial de transmissão de dados. Para garantir uma cobertura eficaz, torna-se necessário o aumento do número de antenas e estações de base, o que, por sua vez, amplia a exposição a campos eletromagnéticos. A poluição eletromagnética refere-se à esta exposição e embora os níveis de radiação não ionizante emitidos por essas fontes sejam considerados seguros de acordo com muitos órgãos reguladores, a exposição constante e crescente a essas emissões tem gerado preocupações sobre seus potenciais efeitos a longo prazo (MARTEL et al., 2023).

Neste contexto, a demanda por materiais absorvedores de radiação tem aumentado significativamente à medida que as redes 5G e outras tecnologias

de comunicação sem fio se expandem. Esses materiais são projetados para absorver e dissipar a energia das ondas eletromagnéticas, contribuindo para reduzir a exposição a campos eletromagnéticos em áreas onde a densidade de antenas e dispositivos de comunicação é alta (YAO et al., 2023). Outrossim, ao reduzir a reflexão e a interferência das ondas eletromagnéticas, esses materiais podem otimizar a eficiência das redes de comunicação, isso significa menos perda de sinal e uma melhoria geral na qualidade da conexão. A aplicação eficaz de materiais absorvedores de radiação pode contribuir para uma convivência mais segura e eficiente com a crescente complexidade das redes de comunicação (ALHARSHAN et al., 2023).

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um estudo sobre a influência de índices de porosidades em níveis controlados em efeito na capacidade de atenuação. A porosidade será induzida em compósitos magnéticos produzidos com uma matriz dielétrica de silicone, e dopantes magnéticos de ferrocenona (FC), na qual serão produzidas nas escalas de 50%, 60% e 70% em peso relacionado a quantidade total de silicone. Os níveis de poros serão controlados através do processo de cura do silicone, com 5 variações no nível de pressão durante a cura, o que leva a 5 níveis de poros diferentes. Os níveis de pressão do presente trabalho serão de -50mmHg, -150mmHg, -250mmHg, -350mmHg, e -450mmHg. E, serão produzidas amostras sem a indução de poros, para caracterização dos materiais sem poros em comparação com os efeitos dos poros.

2 FUNDAMENTAÇÃO

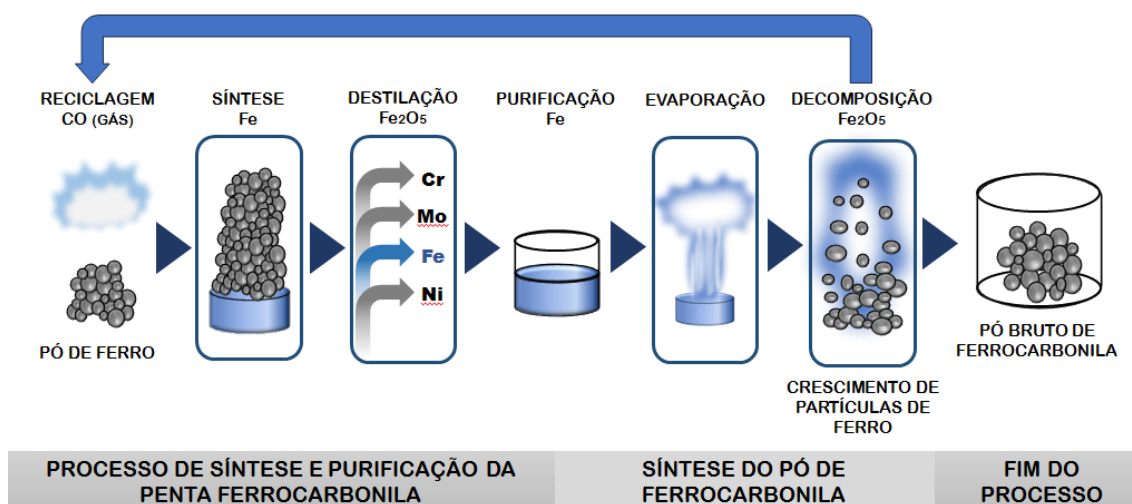
Neste trabalho, de maneira geral, foram utilizados dois materiais para a análise: a ferrocenona e a borracha de silicone.

2.1 Ferrocenona

A ferrocenona tem despertado interesse nas aplicações eletrônicas de materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE), especialmente em núcleos de bobinas de alta frequência. A ferrocenona é derivada da decomposição da ferro-pentacarbonila, um composto que consiste em um átomo de ferro ligado a cinco grupos carbonila. O ferro, compreendendo cerca

de 96% da massa desse material, é responsável pela geração dos momentos magnéticos na ferrocarbonila. A natureza magnética da ferrocarbonila pode variar entre mole e dura, dependendo do método de síntese. Neste estudo, optou-se pelo uso da ferrocarbonila de caráter magnético mole, obtida em uma atmosfera contendo hidrogênio, nitrogênio, carbono e oxigênio. A presença desses átomos reduz a resistência mecânica do material, resultando no aumento da permeabilidade e da capacidade de magnetização (SHEN; LI; XU, 2022) . O processo de síntese da ferrocarbonila empregado pode ser observado na Figura 2.1.

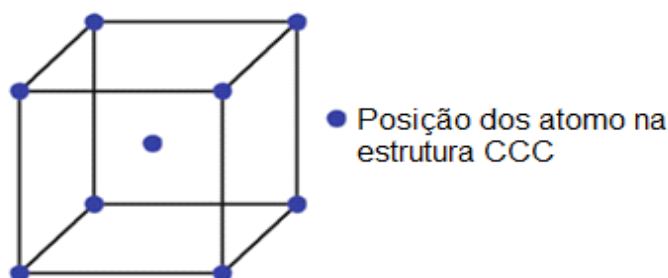
Figura 2.1 - Processo de purificação da Ferrocarbonila



Fonte: Produção do autor.

A ferrocarbonila é composta basicamente pelo ferro na estrutura Ferro- α e algumas regiões dielétricas de Fe_xN e Fe_xC (LOPES, 2020). Desta forma, a estrutura cristalina da ferrocarbonila é majoritariamente composta pela estrutura cúbica de corpo centrado demonstrado na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Estrutura cúbica de corpo centrado referente a estrutura da ferrocarbonila



Fonte: Carter e Norton (2013).

2.2 Borracha de silicone

A descoberta da borracha de silicone remonta ao início do século XX, originando-se da combinação de cloreto de metila e areia de silício. Esse processo resulta em uma cadeia polimérica heterogênea, com átomos de silício (Si) e oxigênio (O) intercalados. A estabilidade dessa estrutura é garantida por grupos laterais metil ligados ao silício, conferindo à borracha de silicone uma notável resistência química. Vale ressaltar que esse material é considerado semi-orgânico, não sendo essencialmente derivado do petróleo (SHIT; SHAH, 2013).

No que diz respeito ao comportamento termomecânico, a borracha de silicone é classificada como um elastômero, exibindo resistência à tração na faixa de 10 a 100 psi. Dependendo do dopante utilizado, ela pode apresentar estabilidade térmica estrutural variando entre -40°C e 200°C . Adicionalmente, esse material possui um elevado módulo de elasticidade, permitindo um alongamento significativo de 300% a 400% (ALIKHANI; MOHAMMADI; SABZI, 2023).

A processabilidade da borracha de silicone é considerada aceitável, devido à sua excelente conformidade durante o processo de cura. Essa característica a torna adequada como material de revestimento em peças de alta complexidade. Sua natureza elastomérica, com poucas ligações cruzadas, possibilita sua aplicação como redutor de vibrações mecânicas em projetos estruturais. A presença de ligações covalentes (Si-O) na cadeia polimérica é fundamental para sua utilização como material isolante em sistemas de transmissão, componentes automotivos, sistemas de armazenamento de

alimentos, dispositivos médicos e diversas outras aplicações (RIUS-BARTRA et al., 2023).

3 METODOLOGIA

3.1 Desenvolvimento das amostras com poros

No trabalho, foram desenvolvidas 6 amostras submetidas à vácuo variando de - 50 mmHg a -450 mmHg, expressas na Tabela 3.1. Houve variação da concentração, sendo de 50%, 60% e 70%, demonstrados na Tabela 3.2.

As amostras da banda K e Ka foram produzidas nas dimensões do guia de onda retangular acoplado a um Analisador de Rede Vetorial, Figura 3.2 (a). O kit da Banda K utilizado está apresentado na Figura 3.2 (b).

Os materiais utilizados foram a Ferrocarbonila da empresa BASF, **Erro! Fonte de referência não encontrada.**(a), e a borracha de silicone da empresa Redelease, **Erro! Fonte de referência não encontrada.**(b). A massa proporcional de cada material, silicone e ferrocarbonila, foi aferida com o uso de uma balança analítica da marca AAKER, **Erro! Fonte de referência não encontrada.**(c).

Figura 3.1 - Materiais para desenvolvimento das amostras, (a) Ferrocarbonila, (b) Silicone Branco e (c) Balança Analítica.

(a)



(b)



(c)



Fonte: Produção do autor.

Tabela 3.1 - Variação da pressão do vácuo.

Amostra	Pressão (mmHg)
1	-50
2	-150
3	-250
4	-350
5	-450
6	Sem poros

Tabela 3.2 - Variação da porcentagem em massa e volume de ferrocarbonila.

% Massa do Material Magnético	% Volume (Ferrocarbonila)
50	12,7
60	21,4
70	26,9

Para o controle da porosidade, os materiais compósitos são colocados no recipiente de controle de pressão apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, e coloca-se a pressão desejada para o experimento, olhando o manômetro. E assim que atingida a pressão se desliga a bomba de vácuo, deixando curar a amostra para atingir o resultado esperado.

Figura 3.2 - Sistema de aplicação de vácuo.



Fonte: Produção do autor.

O processo de síntese do compósito está apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Para se desenvolver uma amostra, após os materiais serem pesados na balança analítica nas proporções desejadas, são colocados em um recipiente a FC e o silicone branco. Em seguida, é misturado de forma manual até que esta atinja a homogeneidade desejada, após isso coloca-se a quantidade indicada de catalisador para reagir com o silicone branco, e então, novamente é misturado manualmente. Feito isso, foi colocado a mistura do compósito no molde de cada banda desejada (K e Ka), e então, curado na pressão em que foi realizado o experimento conforme Tabela 3.1.

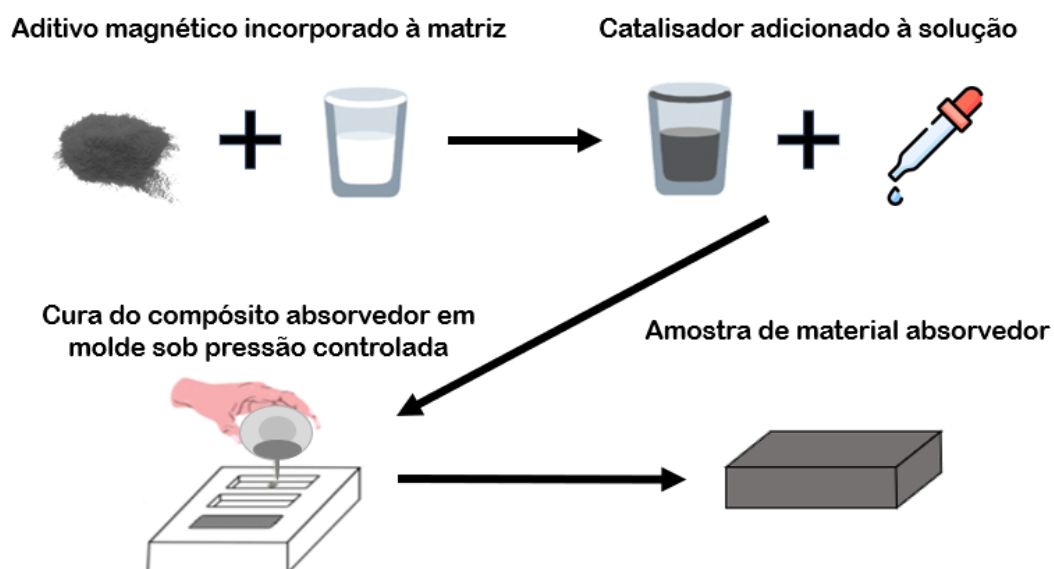
Figura 3.3 Moldes de amostras.



Fonte: Produção do autor.

Para o presente relatório, foram feitas as amostras referentes nas concentrações de 50%, 60% e 70%, conforme a metodologia da **Erro! Fonte de referência não encontrada..** Sendo este um processo interessante pois já demonstrou a capacidade de gerar poros em compósitos a base de silicone.

Figura 3.1 - Etapas dos processamentos de amostras.



Fonte: Produção do autor.

3.2 Caracterização eletromagnética

Nesta etapa do trabalho, iniciou-se a caracterização das amostras por meio do VNA na faixa de 18 GHz - 26,5 GHz (Banda K) e 26,5GHz – 40 GHz (Banda Ka). A caracterização eletromagnética foi realizada usando o modelo matemático de Nicholson Ross Weir (NRW) para um guia de onda retangular e o ensaio de refletividade. O NRW utiliza os sinais referentes aos parâmetros S medidos no VNA, medidos através do guia de onda retangular. O parâmetro S descreve a razão entre o potencial de uma determinada radiação incidente na amostra e os potenciais dos respectivos sinais de respostas devido aos fenômenos de reflexão e transmissão. Desta forma a partir das respostas em termos de reflexão e transmissão, o modelo NRW permite a definição das propriedades permissividade elétrica complexa ($\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$) e permeabilidade magnética complexa ($\mu = \mu' - j\mu''$). A relação entre a parcela real e a parcela imaginária das propriedades permissividade e permeabilidade é analisada através da tangente de perda para análise da razão entre os fatores dissipativos (ϵ'' , μ'') e capacitivos (ϵ' , μ') no interior do material. As tangentes de perdas elétrica ($\tan \delta_\epsilon$) e magnética ($\tan \delta_\mu$) são definidas conforme as equações 1 e 2.

$$\tan \delta_\epsilon = (\epsilon''/\epsilon') \quad \text{Equação 1}$$

$$\tan \delta_\mu = (\mu''/\mu') \quad \text{Equação 2}$$

3.3 Ensaio de refletividade

O potencial de absorção eletromagnética foi caracterizado a partir do método de Refletividade no guia de onda retangular. Este método é realizado com a utilização de uma placa metálica atrás da amostra dentro do guia de onda retangular, na qual a placa metálica impede que ocorra o fenômeno de transmissão. Na Refletividade, o analisador de rede realiza a medição do sinal refletido e o sinal não refletido é definido como o potencial de absorção.

O método de Refletividade é definido matematicamente pela Equação 3 utilizando a relação de impedâncias descritas pela Equação 4. Onde Z_{in} é a impedância do meio material, μ_r é a permeabilidade absoluta relativa, ϵ_r é a permissividade absoluta relativa, t é a espessura da amostra, f é a frequência analisada, e c é a velocidade da luz.

$$\text{Refletividade (dB)} = 20 \log_{10} \left| \frac{Z_{in} - 1}{Z_{in} + 1} \right|$$

Equação 3

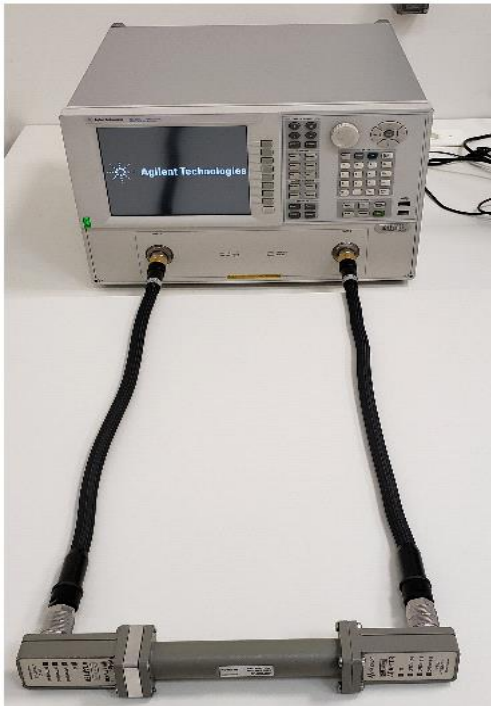
$$Z_{in} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh \left\{ j \left(\frac{2\pi f t}{c} \right) \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right\}$$

Equação 4

Figura 3.2 - (a) Analisador de Rede Vetorial e (b) Kit da banda K

(a)

Analisador de Rede Vetorial



(b)

Kit Banda K



(c)

Kit Banda Ka



Fonte: Produção do autor.

3.4 Propriedades eletromagnéticas

Os parâmetros de espalhamento, definidos como Parâmetro-S, foram utilizados para calcular a permeabilidade magnética complexa e a permissividade elétrica complexa. As medições foram feitas com o método proposto por Nicholson-Ross-Weir (NRW) e que também é conhecido como método de transmissão e reflexão para materiais

homogêneos e isotrópicos (ARSLANAGIĆ et al., 2013).

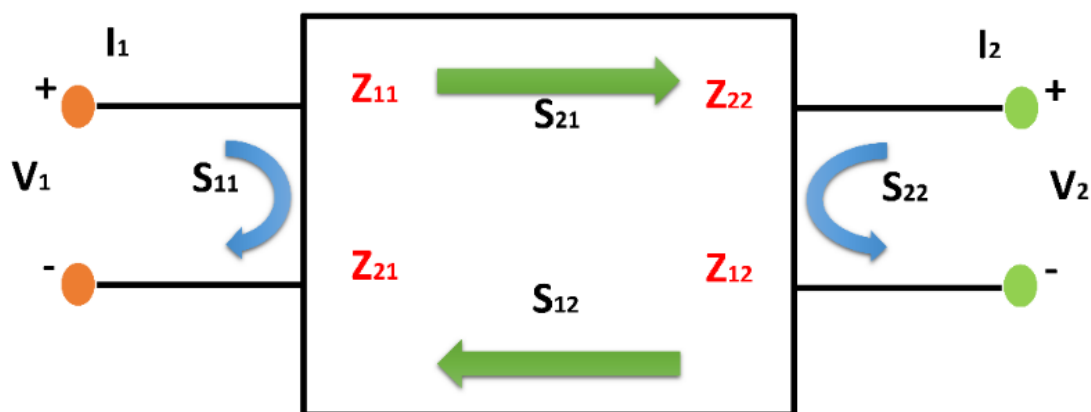
Neste trabalho o alvo do estudo foram as bandas K (18 – 26,5 GHz) e Ka (26,5 – 40 GHz). A permissividade elétrica ε e a permeabilidade magnética μ são definidas como propriedades de um determinado meio material. Estas propriedades são definidas de acordo com o comportamento macroscópico interno quando submetido a um campo elétrico, magnético ou eletromagnético. A distorção interna de um material devido à excitação gerada pelo campo aplicado causa uma variação na distribuição das nuvens eletrônicas no interior do material. Esta distorção tem relação direta com a capacidade de absorção de energia da radiação incidente por parte do mesmo. Desta forma, é de suma importância a caracterização destas propriedades a fim de estudar e analisar como controlar e melhorar o potencial de absorção de um material compósito variando sua composição interna (HUANG et al., 2012).

As propriedades de permissividade elétrica complexa e permeabilidade magnéticas complexa podem ser descritas de acordo com as fórmulas 1 e 2, onde a parte real (ε' , μ') são referentes aos fenômenos capacitivos e a parte imaginária (ε'' , μ'') são referentes os fenômenos dissipativos do material (PANWAR et al., 2010).

3.5 Caracterização do comportamento eletromagnético

A Figura 3.3 apresenta os sinais de transmissão e reflexão gerados no interior de um guia de onda retangular. O Parâmetro-S ou S_{ij} é definido como parâmetro de espalhamento da onda eletromagnética emitida em uma determinada amostra. A onda eletromagnética ao interagir com o material irá gerar 2 sinais de resposta devido aos fenômenos de reflexão e transmissão (BONALDI; SIORES; SHAH, 2014). O termo $|S_{11}|^2$ é referente a parcela da energia emitida e refletida na porta 1, enquanto o parâmetro $|S_{21}|^2$ refere-se a energia transmitida pela porta 1 e recebida na porta 2, ou seja, essa parcela de energia é resultado da transmissão da onda através do material analisado (KARIMI; OSTOJA-STARZEWSKI; JASIUK, 2016). De forma similar, o sinal emitido pela porta 2 também é analisado devido aos fenômenos de reflexão $|S_{22}|^2$ e transmissão $|S_{12}|^2$.

Figura 3.3 - Representação esquemática dos sinais referentes ao parâmetro S dentro de um guia de onda



Fonte: Lopes, 2020.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O foco deste estudo se dá pela investigação da capacidade de produção de amostras de materiais compostos com a presença controlada de poros, utilizando um método de síntese específico descrito na Figura 3.1. Esse procedimento envolve a aplicação de pressão negativa durante o processo de cura do silicone. A relação entre as amostras e a pressão aplicada está detalhada na Tabela 4.1.

4.1 Desenvolvimento de amostras porosas com concentração de 50%, 60% e 70% de FC.

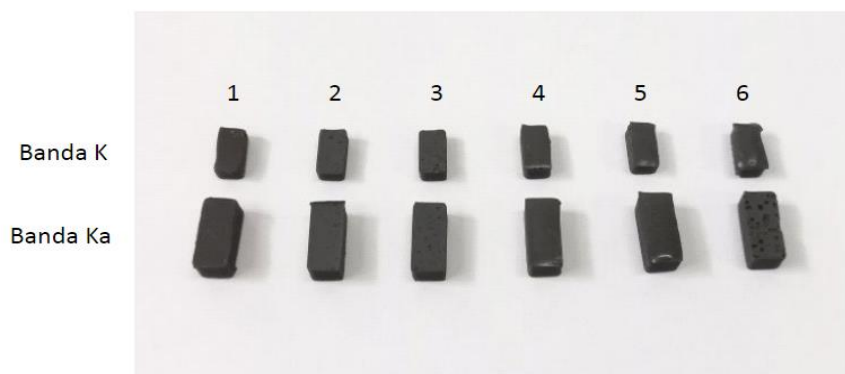
As amostras estão apresentadas na Figura 4.1, respectivamente na Figura 4.1(a) com concentração de 50%, Figura 4.1(b) com concentração de 60% e Figura 4.1(c) com concentração de 70%. E a ordem das pressões aplicadas no vácuo é decrescente, começando à: -50, -150, -250, -350 e -450 mmHg. Em todas as concentrações foi realizado a fabricação de uma amostra (amostra 1) sem aplicação das pressões de vácuo para ser utilizada como a referência do material. A análise das amostras apenas com a variação do vácuo com 50% e 60%, já demonstrou um crescente aumento no diâmetro dos poros de forma controlada, sendo este o primeiro princípio do trabalho. Vale destacar que o próximo passo é realizar a caracterização eletromagnética das amostras.

Tabela 4.1 - Relação entre amostras e pressão.

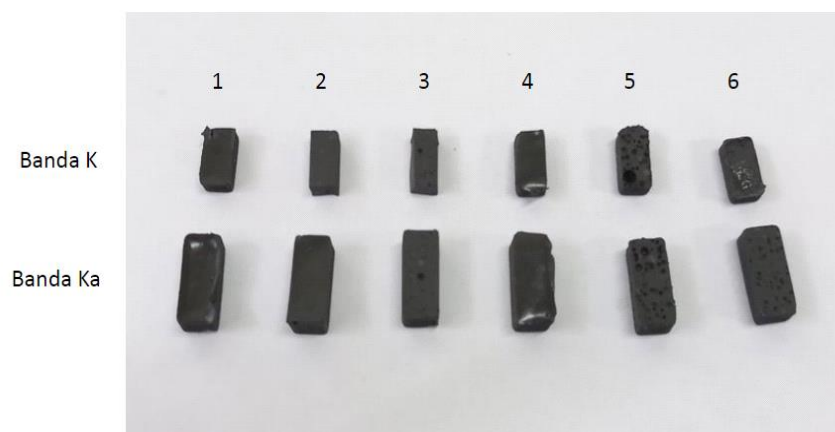
Amostra	1	2	3	4	5	6
Pressão	-50mmHg	-150mmHg	-250mmHg	-350mmHg	-450mmHg	0mmHg

Figura 4.1 - Foto das amostras da Banda K e Ka, nas concentrações de (a) 50%, (b) 60%, e (c) 70% de FC.

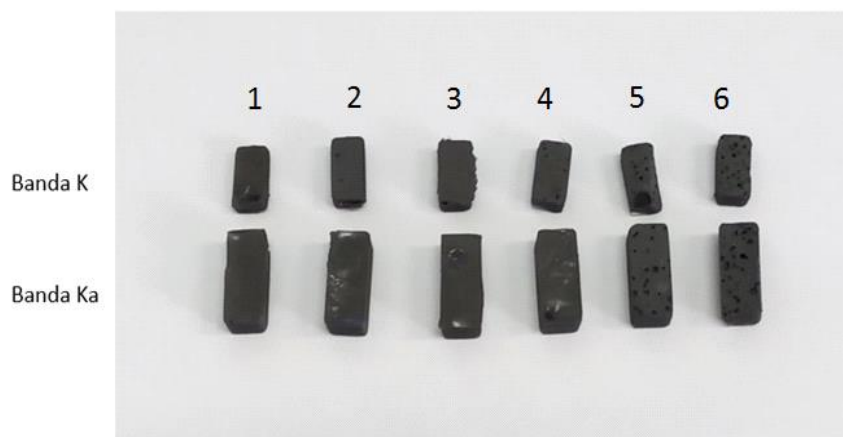
(a)



(b)



(c)



4.2 Caracterização Eletromagnética

Para a caracterização eletromagnética, foram calculadas a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética, tanto a parte real quanto imaginária, bem como as tangentes de perda elétrica e magnética, utilizando as equações 1 e 2. O potencial de atenuação dos materiais desenvolvidos neste trabalho foi analisado através do ensaio de refletividade. Paralelamente, utilizando as equações 7,8 e 9, foram calculadas a capacidade de absorção (A), transmissão (T) e reflexão (R) do material através de ensaios de transmissão e reflexão. Essa análise foi realizada para entender como a porosidade afeta o comportamento eletromagnético do compósito.

$$\varepsilon = \varepsilon' - j \varepsilon'' \quad \text{Equação 5}$$

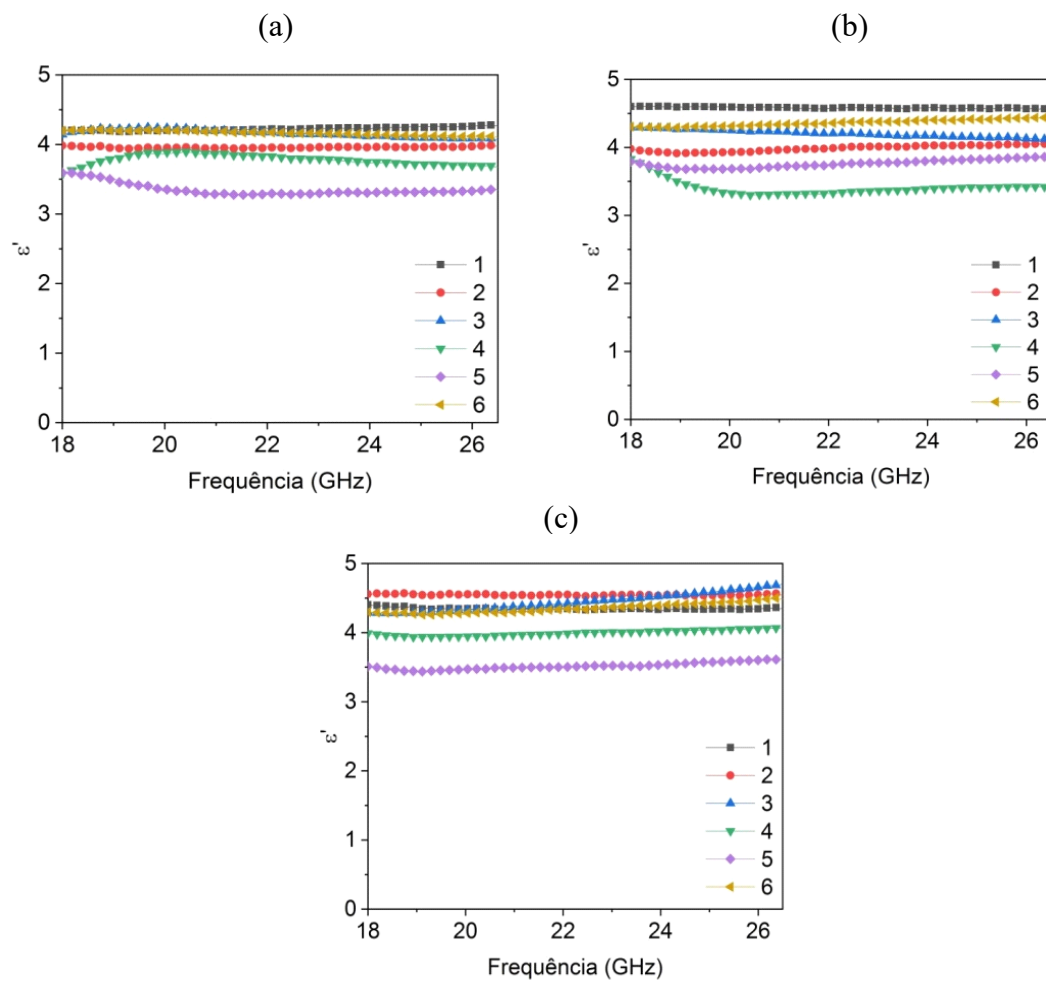
$$\mu = \mu' - j \mu'' \quad \text{Equação 6}$$

Os resultados referentes à Banda K (Figura 4.2 a Figura 4.5) demonstraram que a parcela real da permissividade alcançou um valor médio 4 para amostras com 50% e 4,3 para 60% e 70%, mesmo com a presença de bolhas. Desta forma podemos destacar que a presença de bolhas não prejudicou o comportamento elétrico global das amostras. O comportamento magnético para as amostras apresentou comportamento da parcela real comum aos materiais não magnéticos, porém a parcela imaginária apresentou um acréscimo com aumento considerável para as amostras com 60% alcançando o valor próximo a 1 para a amostra 4.

Quanto aos resultados da banda Ka (Figura 4.6 a Figura 4.9), os resultados revelam que a parcela real da permissividade variou entre 3 e 5 e que a densidade de poros pode alterar levemente este resultado. Na parcela imaginária, todas as amostras variaram entre -2 e 2, porém todas tenderam a 0 com o aumento da frequência. Os resultados das parcelas real e imaginária da permeabilidade magnética se mantiveram entre 0 e 1, sem muitas variações.

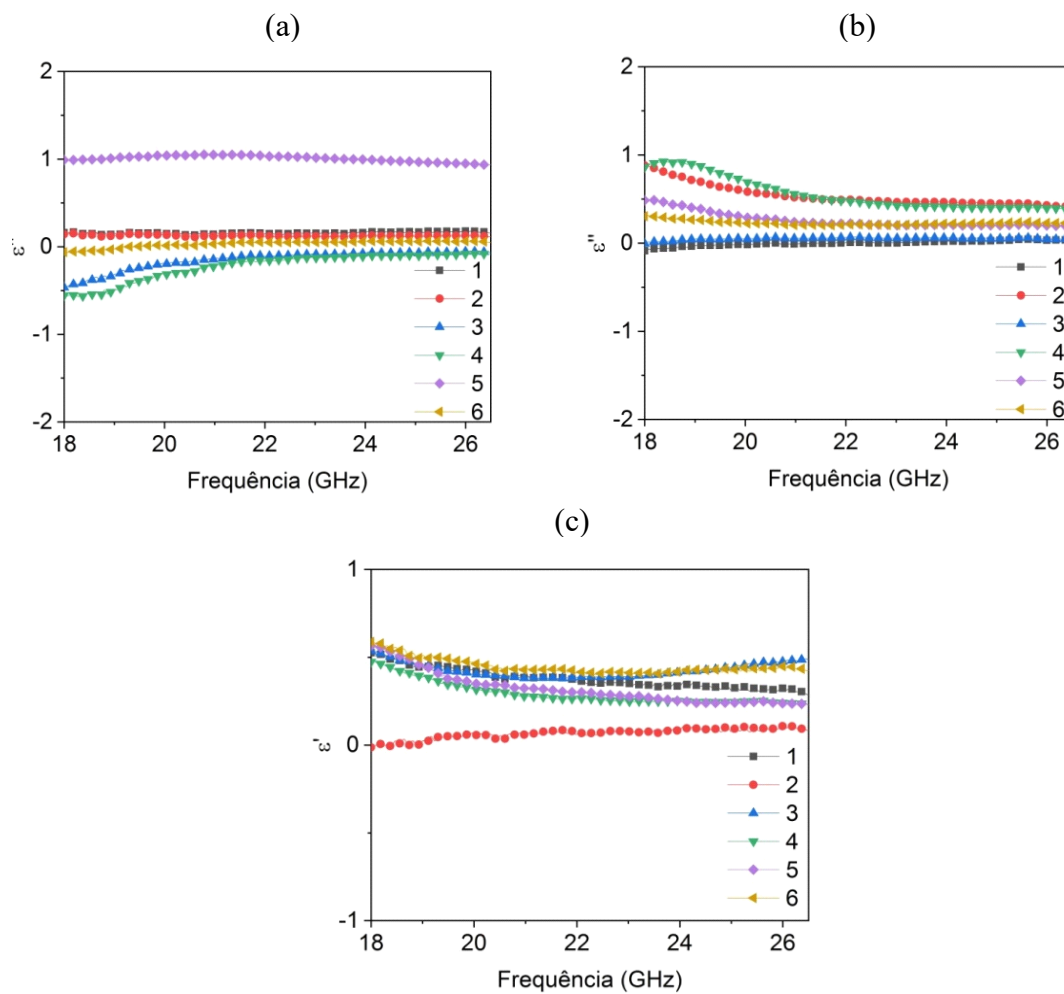
4.2.1 Banda K

Figura 4.2 - Parcela real da permissividade elétrica na banda K das concentrações de (a) 50%, (b) 60% e (c) 70% FC.



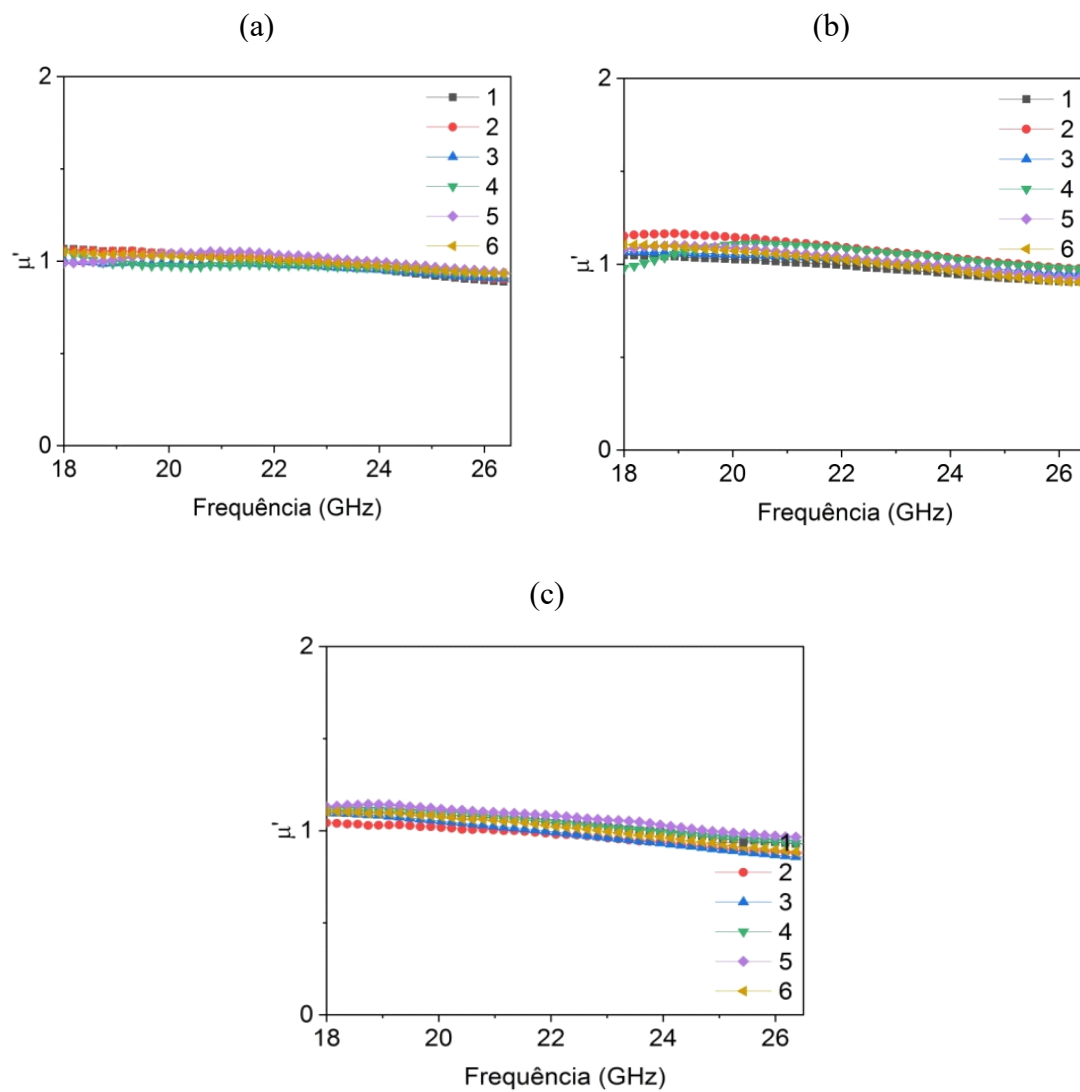
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.3 - Parcela imaginária da permissividade elétrica na banda K das concentrações de (a) 50%, (b) 60% e (c) 70% FC.



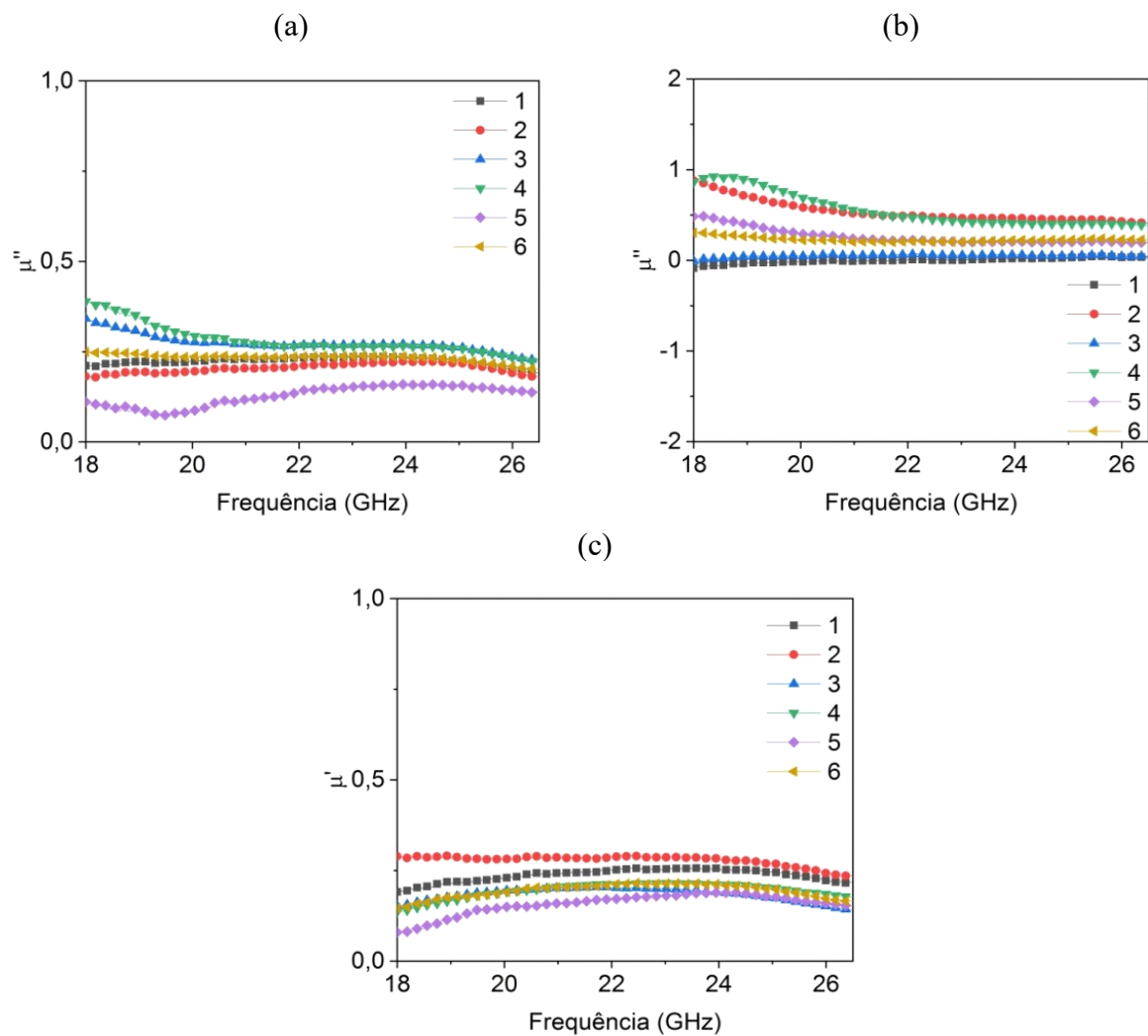
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.4 - Parcela real da permeabilidade magnética na banda K das concentrações de (a) 50%, (b) 60% e (c) 70% FC.



Fonte: Produção do autor

Figura 4.5 - Parcela imaginária da permeabilidade magnética na banda K das concentrações de (a) 50%, (b) 60% e (c) 70% FC.



Fonte: Produção do autor.

4.2.2 Banda Ka

Figura 4.6 - Parcela real da permissividade elétrica na banda Ka das concentrações de (a) 50%, (b) 60% e (c) 70% FC.

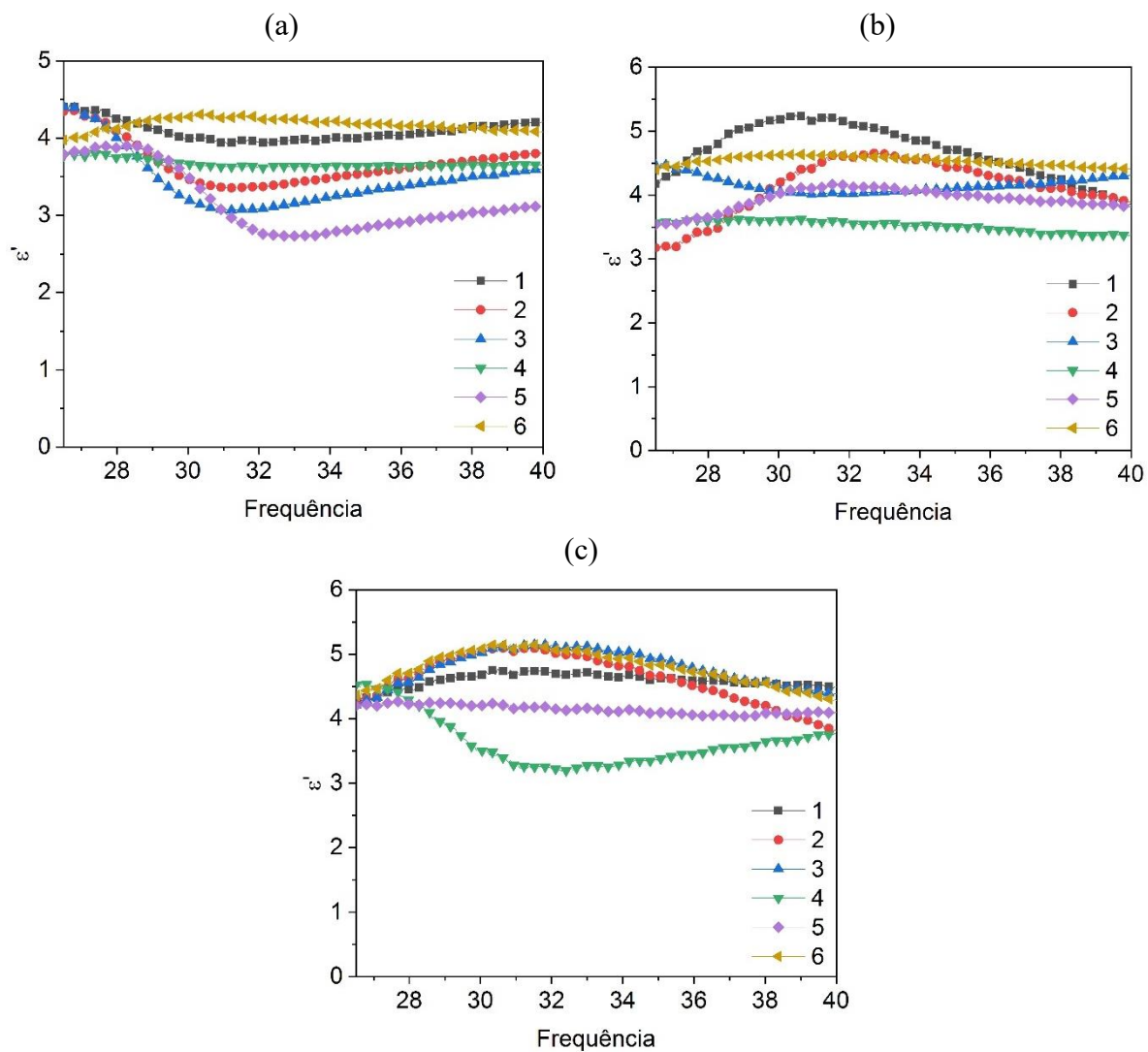


Figura 4.7 - Parcela imaginária da permissividade elétrica na banda Ka das concentrações de (a) 50%, (b) 60% e (c) 70% FC.

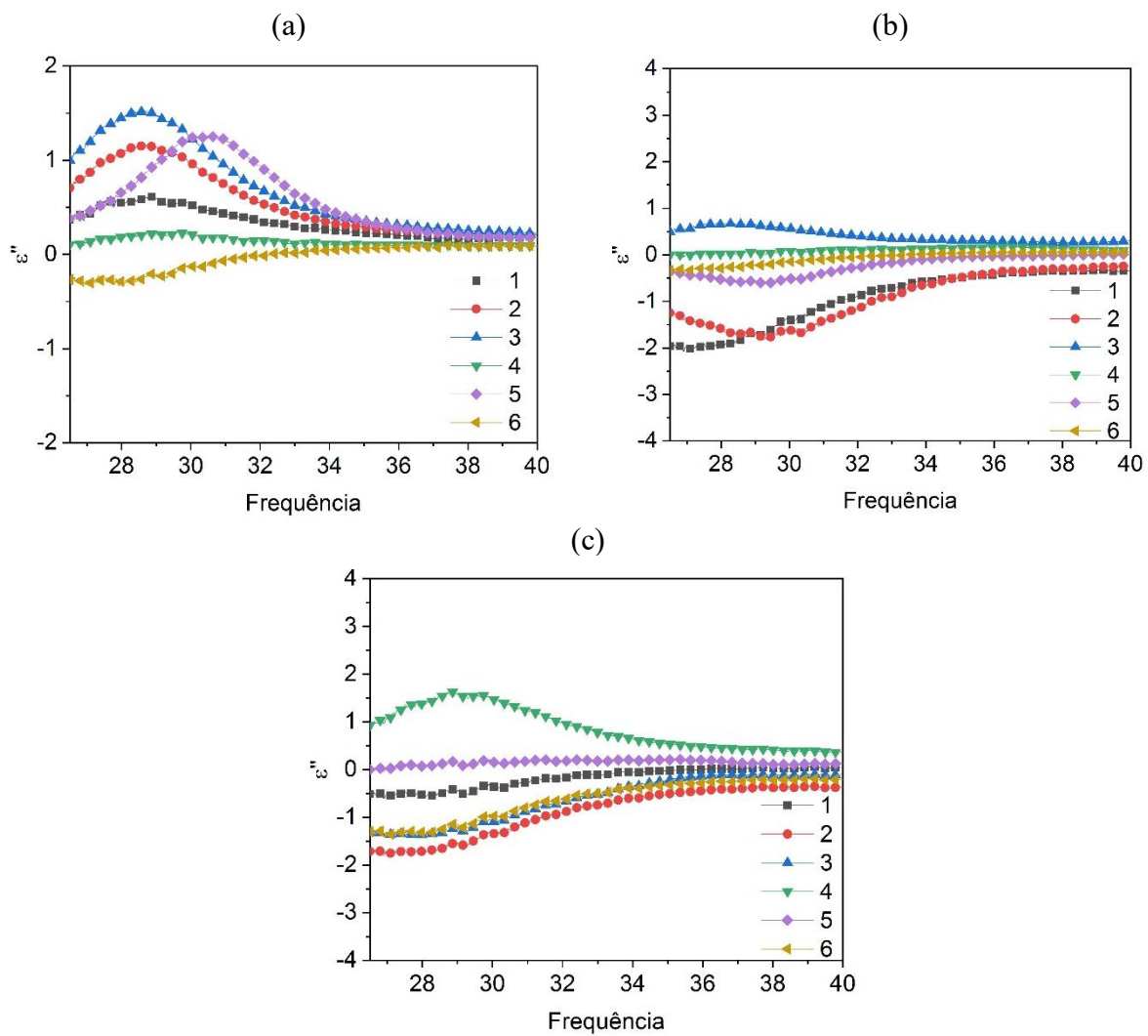


Figura 4.8 - Parcela real da permeabilidade magnética na banda Ka das concentrações de (a) 50%, (b) 60% e (c) 70% FC.

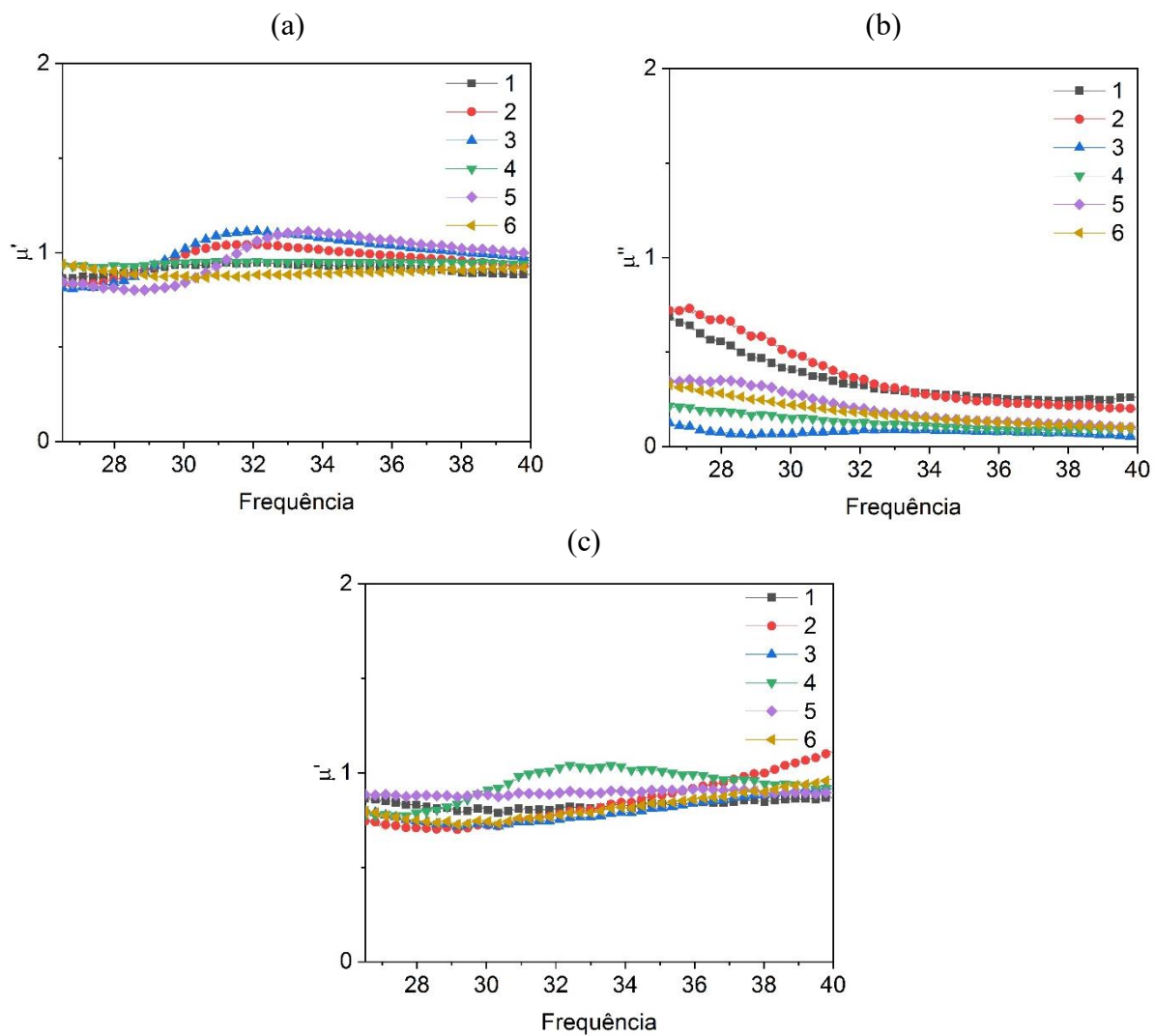


Figura 4.9 - Parcela imaginária da permeabilidade magnética na banda Ka das concentrações de (a) 50%, (b) 60% e (c) 70% FC.

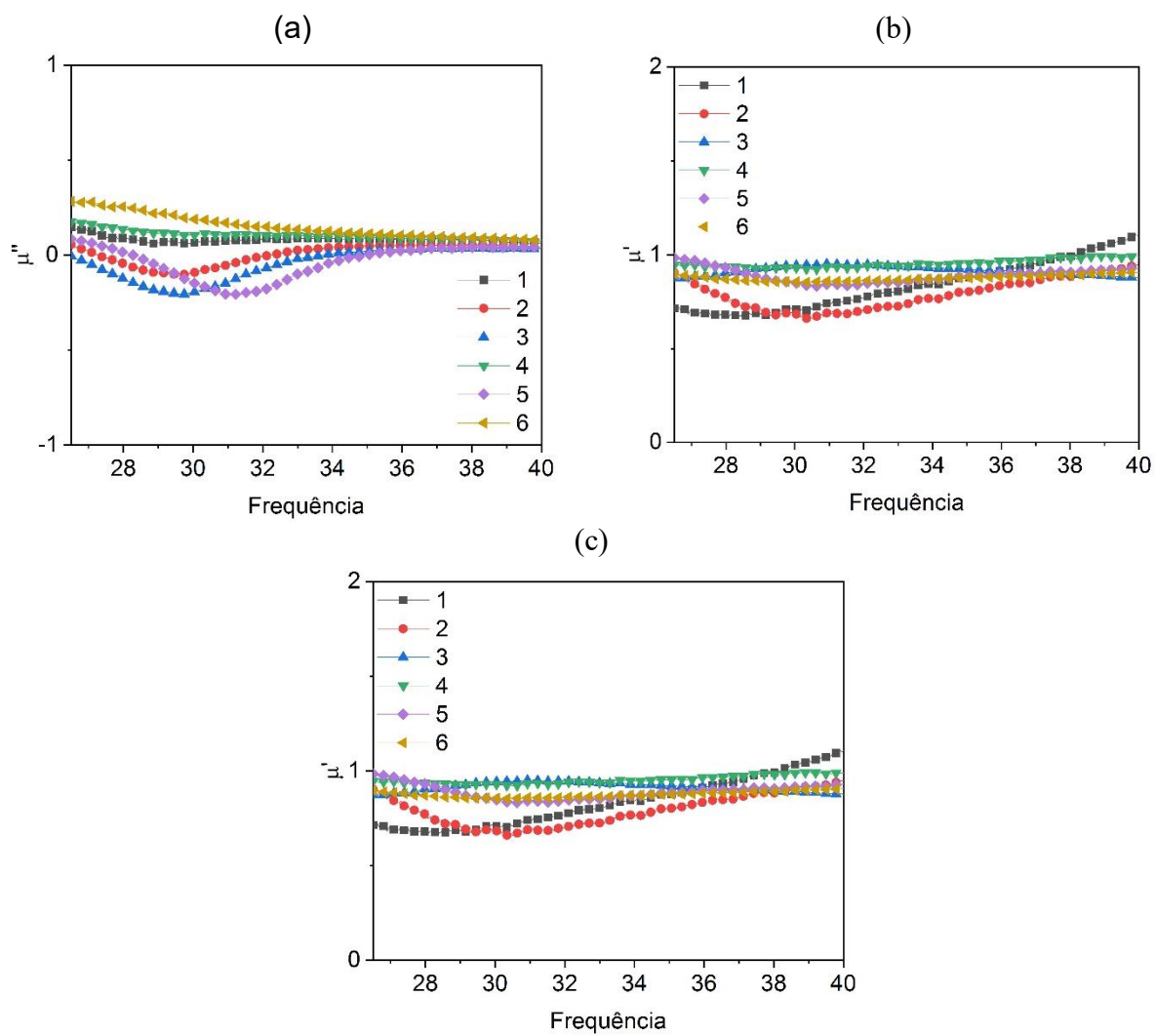
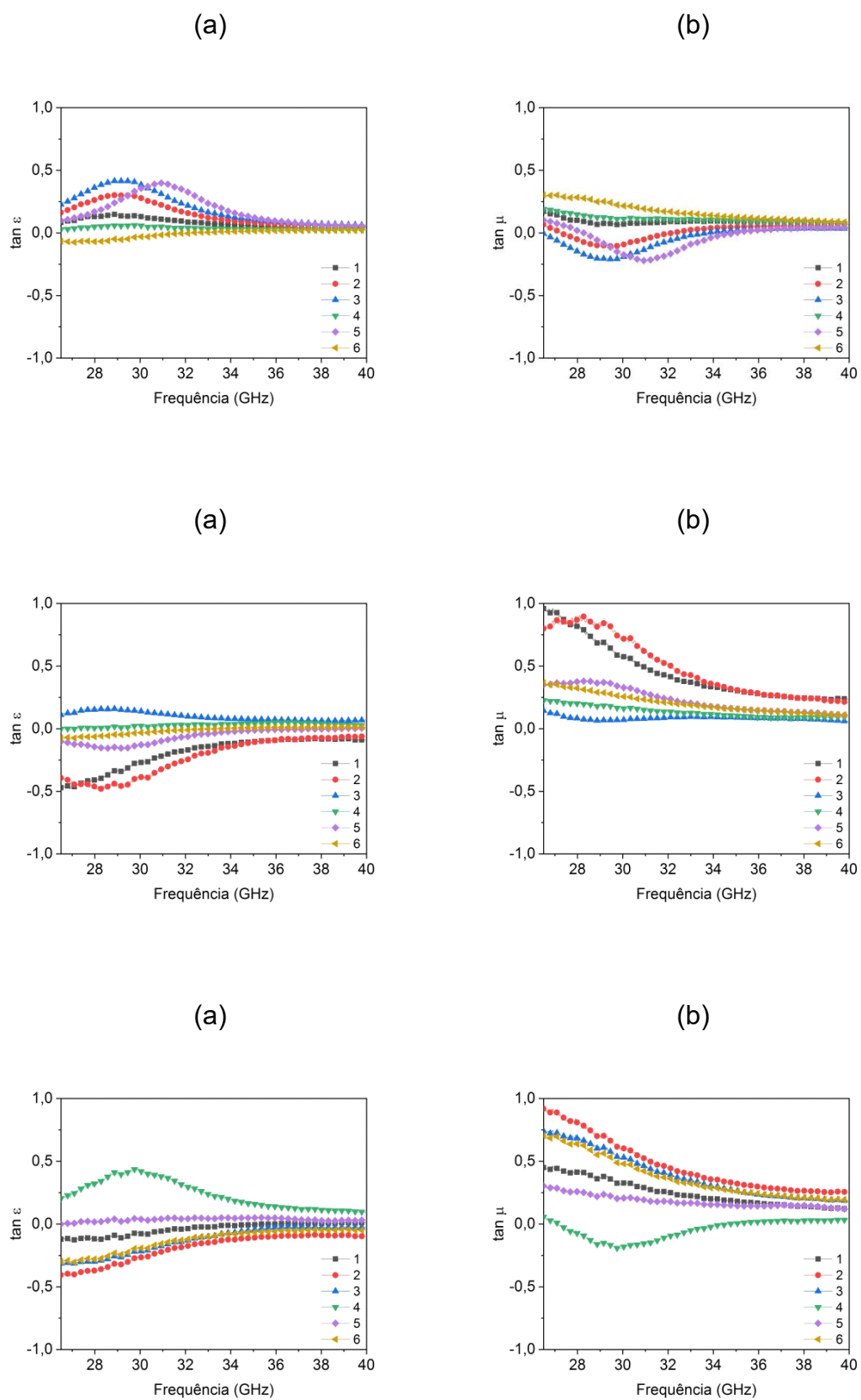


Figura 4.10 - Tangente de perda



Fonte: Produção do autor.

4.3 Absorbância, Refletância e Transmitância

A energia refletida, transmitida e absorvida pode ser descrita conforme as equações 5, 6, 7 para quantificar a refletância R , transmitância T e absorbância A de um determinado material (MISHRA; SINGH; DHAWAN, 2013).

$$R = |S_{11}|^2 \quad \text{Equação 7}$$

$$T = |S_{21}|^2 \quad \text{Equação 8}$$

$$A = 1 - R - T \quad \text{Equação 9}$$

Os resultados obtidos a partir dos cálculos de absorbância, refletância e transmitância das bandas K e Ka demonstraram variações de acordo com o nível de porosidade das amostras como é possível analisar nos gráficos das páginas seguintes. Na banda K, é possível observar que, nas três concentrações de FC, a absorbância permaneceu entre 0% e 20% nas amostras de 50% e 60%, porém na amostra de 70%, permaneceu constante em 60%. A transmitância varia entre 20% e 40%, enquanto a reflexão permanece em 20%. Na banda Ka é possível observar diferenças da banda K, como na absorbância, que desce de 60% para 40%. A refletância na amostra de 50% sobe de 15% a 30%, já nas amostras de 60% e 70%, há muita variação, sendo entre 10% e 40%. Na transmitância, aparenta ter um pequeno aumento de 10%, variando a porcentagem de início nas três amostras, sendo a de 50% como aproximadamente 30%, 60% tendo início em 25%, e na amostra de 70%, se inicia por volta de 20%.

Como é possível analisar, a variação é mais notável na amostra mais porosa (-450mmHg). Tal fato pode ter ocorrido devido a presença de poros nas amostras, fazendo com que o material sofra múltiplas reflexões no contato entre material e ar, o que é ilustrado posteriormente na Figura 5.3.

4.3.1 Banda K

Figura 4.11 – Variação ART na banda K da amostra de 50% de FC

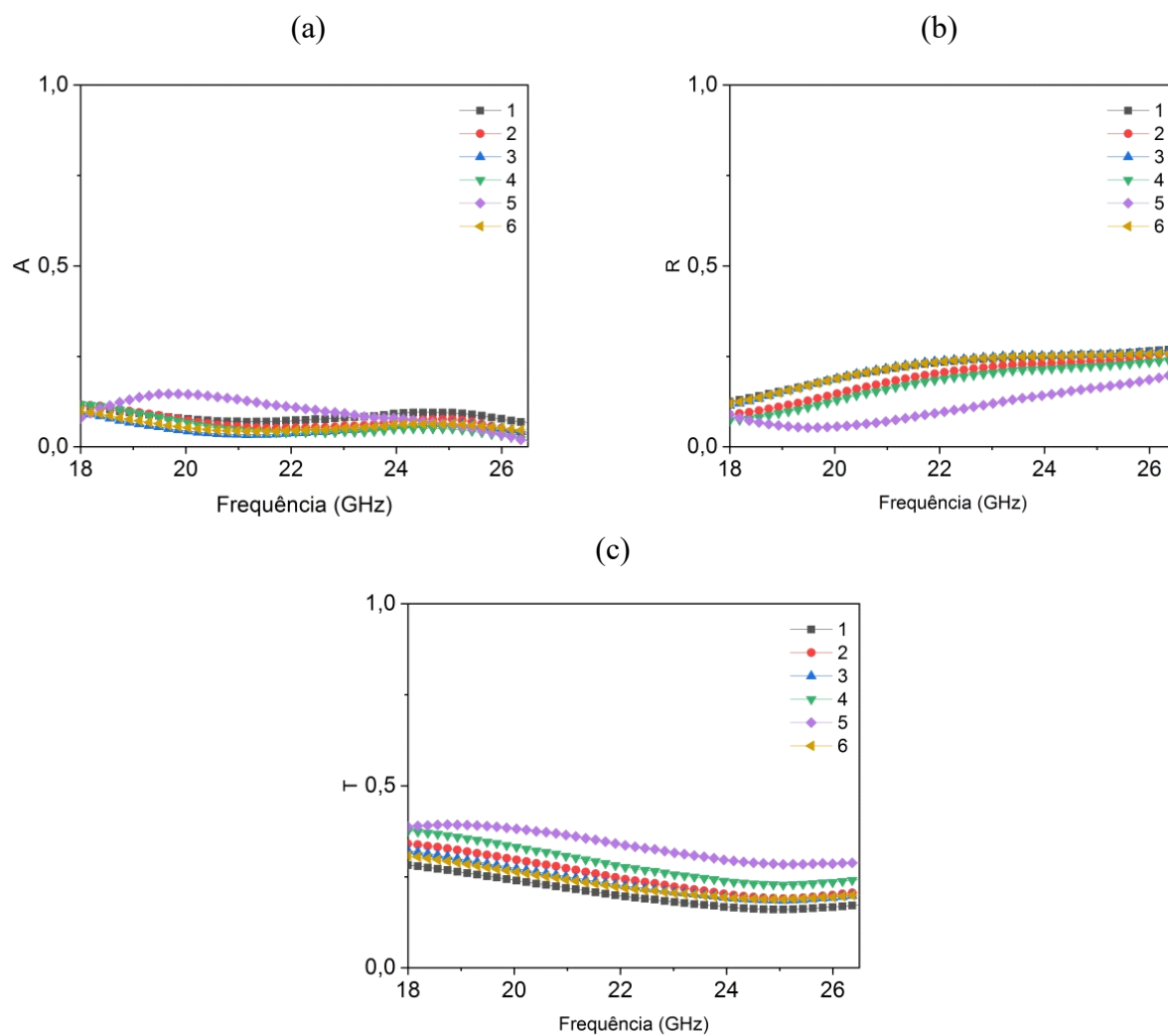
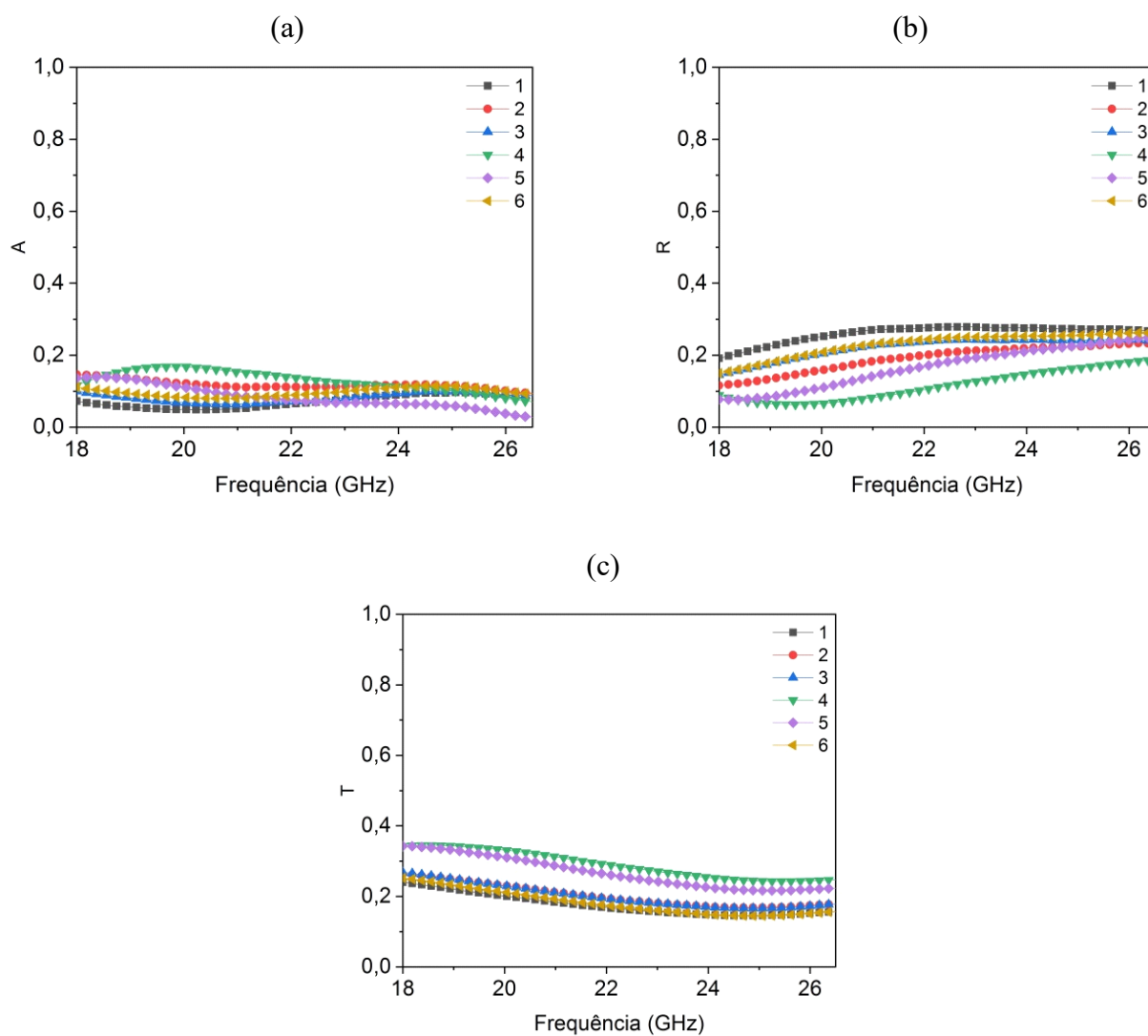
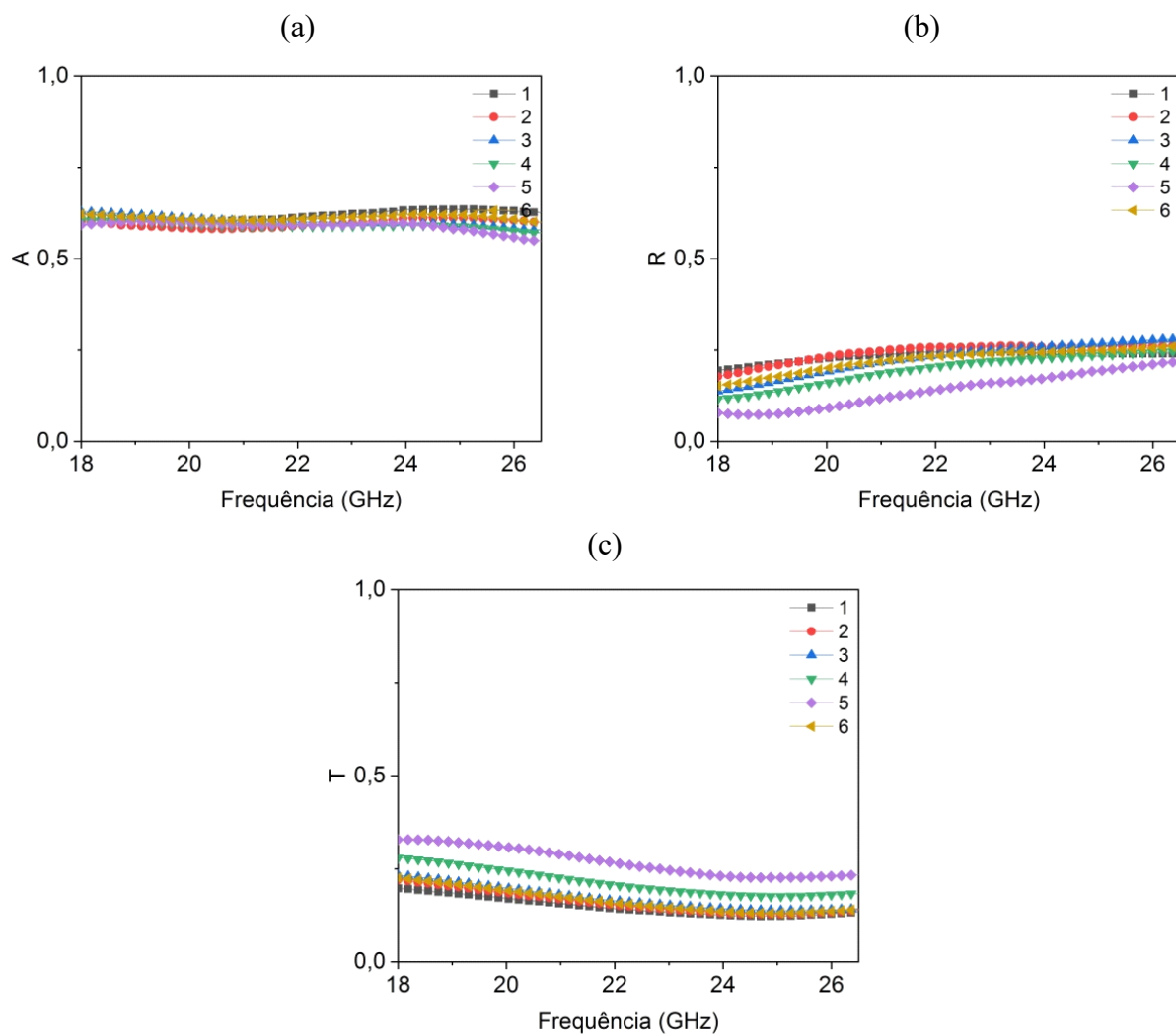


Figura 4.12 - Variação ART na banda K da amostra de 60% de FC



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.13 - Variação ART na banda K da amostra de 70% de FC



4.3.2 Banda Ka

Figura 4.14 - Variação ART na banda Ka da amostra de 50% de FC

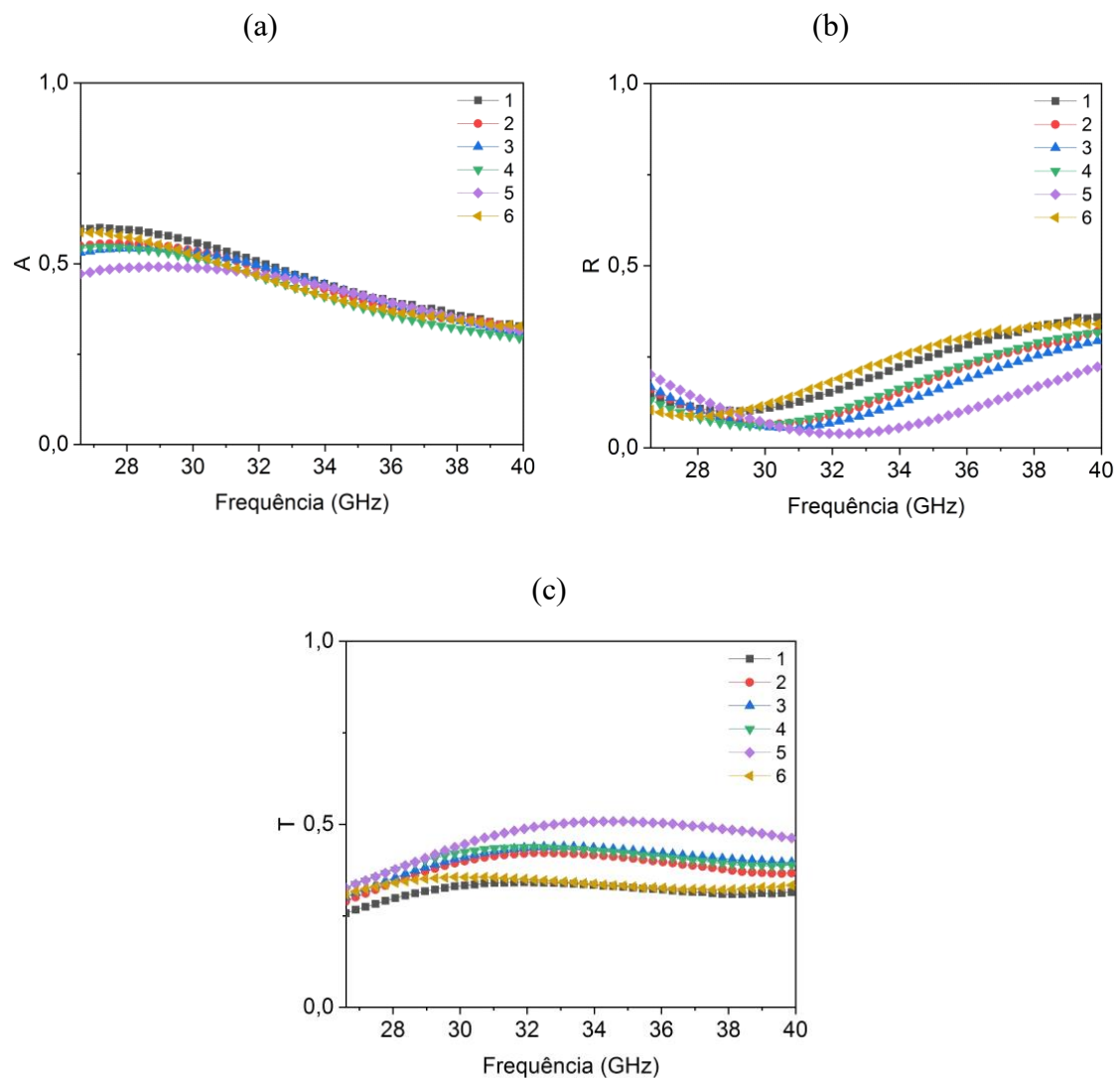
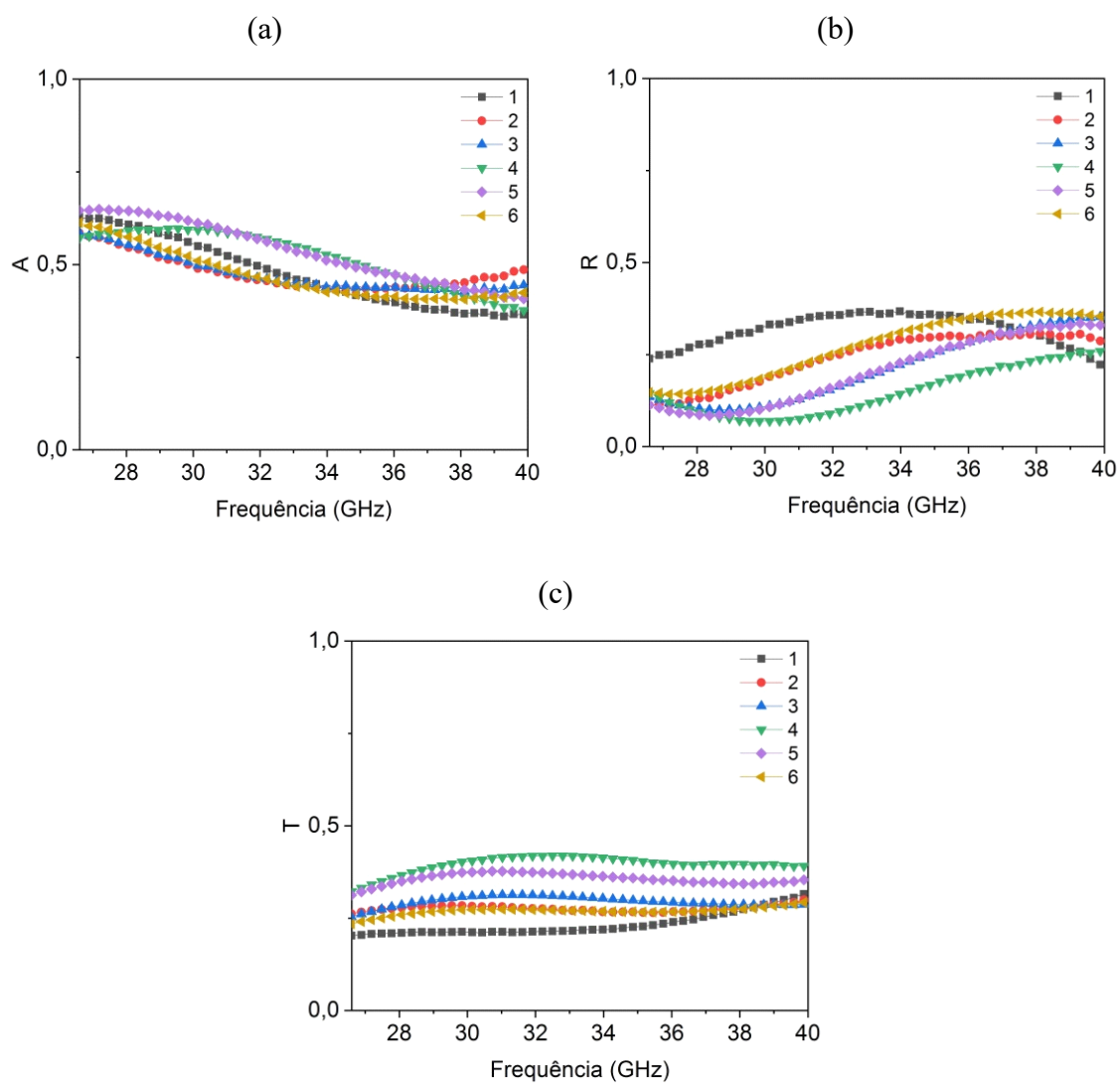
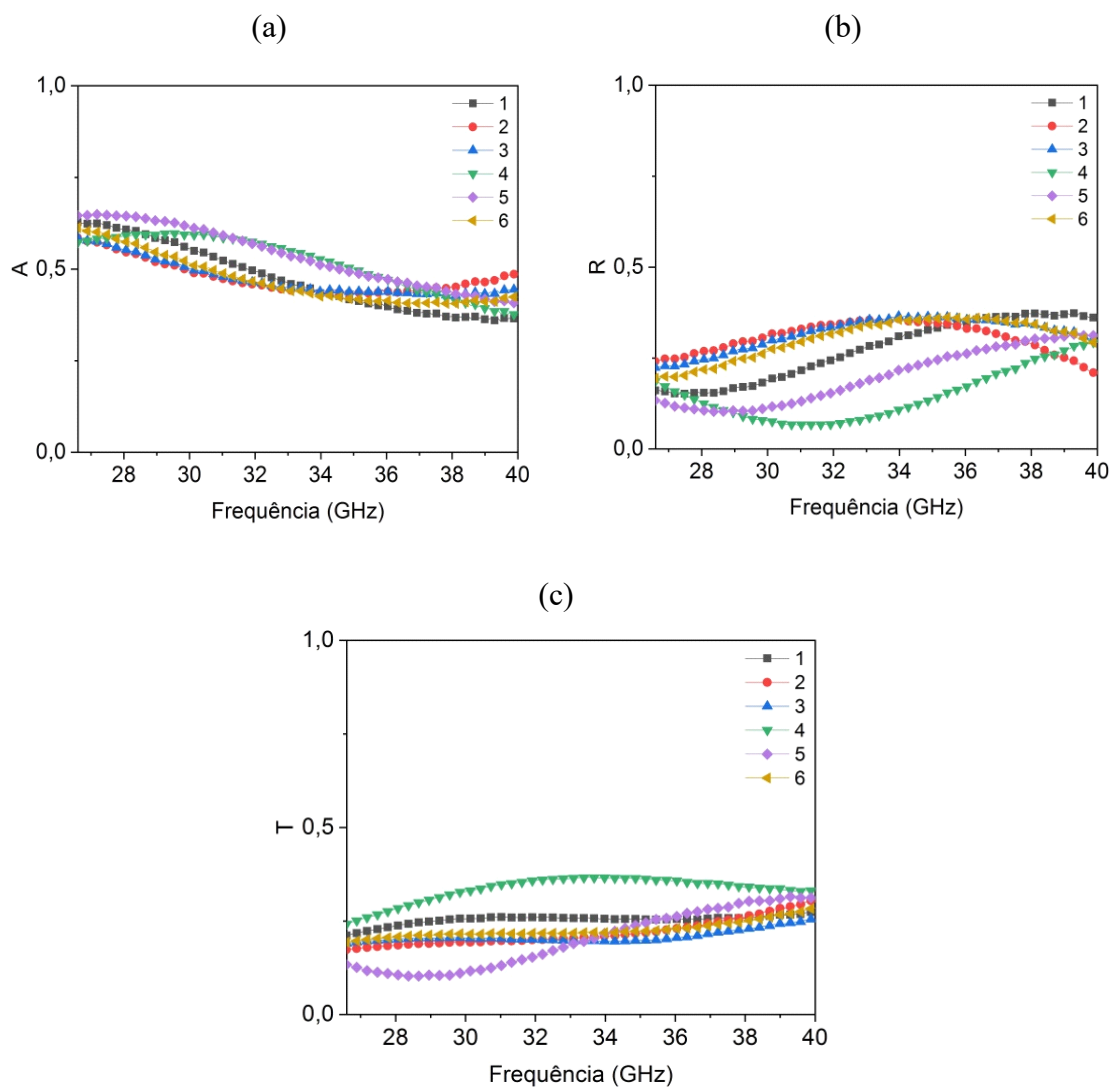


Figura 4.15 - Variação ART na banda Ka da amostra de 60% de FC



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.16 - Variação ART na banda Ka da amostra de 70% de FC

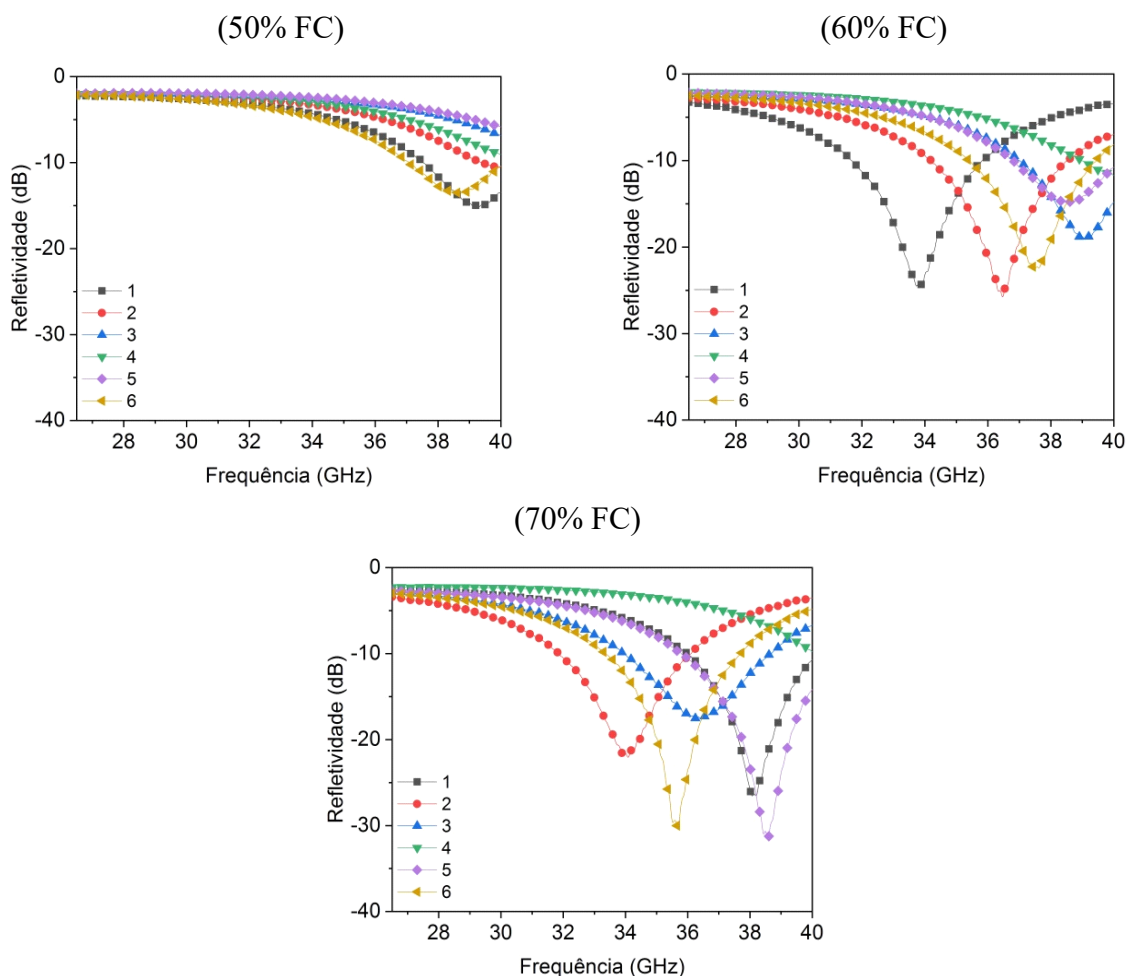


Fonte: Produção do autor

5 ENSAIO DE REFLETIVIDADE

Na Figura 5.1, em 50% FC é possível observar que a amostra 1 (-50mmHg) obteve picos maiores de absorção, sendo -15,19 dB para a frequência 39,27 GHz, se comparado com a amostra submetida a maior pressão (-450 mmHg) que teve um pico de -14 dB para a frequência 38,6 GHz. Porém, nos gráficos de 60% e 70% FC mostram que conforme se aumenta a quantidade de FC, os picos, além de terem maiores valores de absorção, se deslocaram sobre a frequência. Neste caso, a que mais se sucedeu foi a amostra 2 (-150 mmHg), obtendo picos de -25,76 dB na frequência 36,47 GHz para a amostra com 60% de FC, e para 70% de FC o pico foi de -31,65 dB na frequência de 38,57 GHz na amostra 5 (-450mmHg). Sendo assim, uso de poros em compósitos provavelmente colabora para a atenuação da radiação eletromagnética, mas somente em amostras de 70% de FC, visto que o maior pico se encontra na amostra que sofreu mais pressão (-450 mmHg), ou seja, mais porosa.

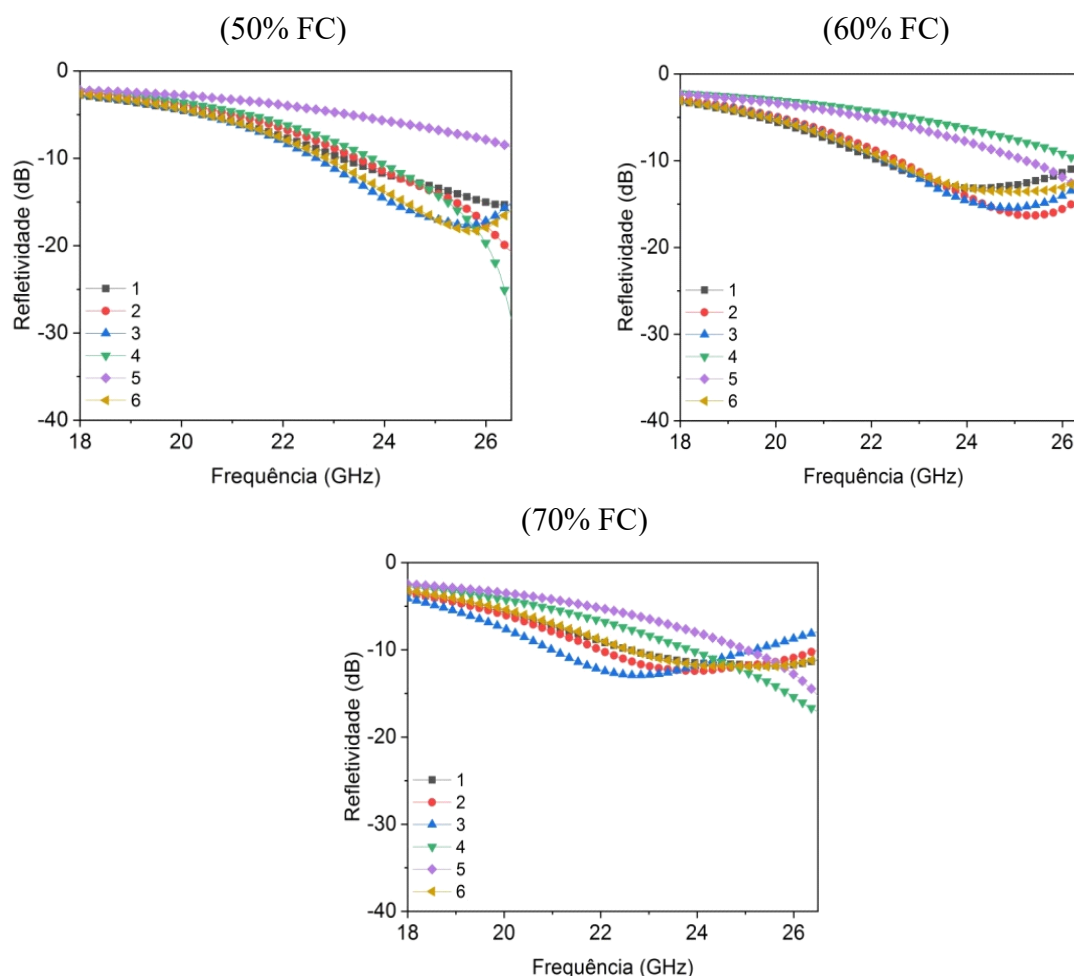
Figura 5.1 - Refletividade das amostras com concentrações de FC de 50% (a), 60% (b) e 70% (c) para a banda Ka.



Fonte: Produção do autor.

O ensaio de refletividade da banda K obteve resultados bem diferentes. A amostra de 50% de FC obteve o melhor resultado desta banda, na pressão 4 (-350mmHg) com -28,42 dB em 26,5 GHz, conforme a Figura 5.2. Os picos de atenuação eletromagnética, nesta banda, não seguem na ordem conforme os níveis de pressão, pois o pior resultado também está presente na amostra de 50% de FC, sendo a pressão 5 (-450mmHg) com -8,76 dB em 26,5 GHz. Nas amostras com 60% e 70% de FC, as amostras permanecem acima de -20 dB, tendo como melhor resultado 17,09 dB em 26,5 GHz.

Figura 5.2 - Refletividade das amostras com concentrações de FC de 50% (a), 60% (b) e 70% (c) para a banda K.



Fonte: Produção do autor

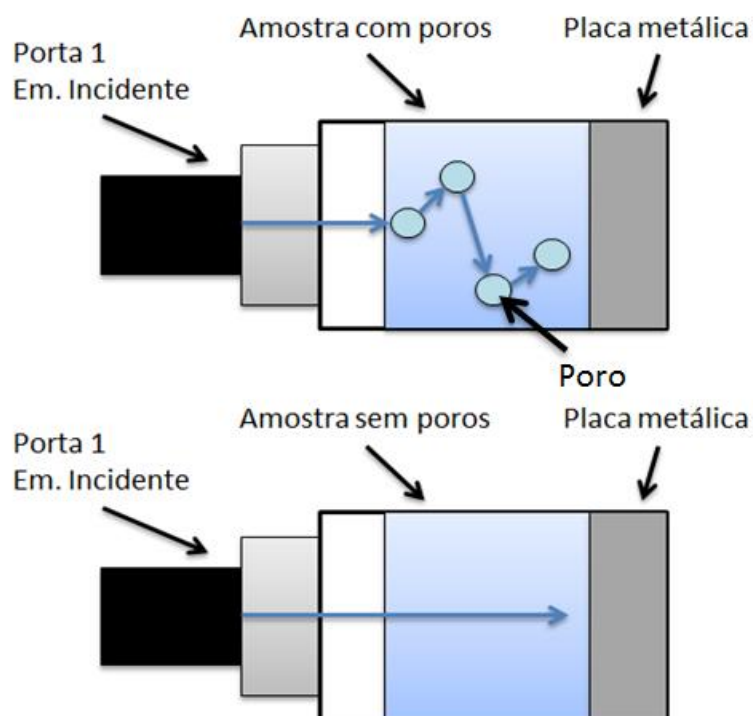
O ensaio da refletividade é realizado utilizando uma placa metálica atrás das amostras, como demonstrado na Figura 5.3. É importante perceber que é possível obter resultados diferentes quando aplicados para diferentes faixas de frequência (Banda K e Ka). Este fato pode ser analisado conforme a equação 5 descrita anteriormente, que é uma grandeza inversamente proporcional, conforme se aumenta a espessura t da amostra, a frequência f diminui e é possível notar que o tamanho dos offsets de cada banda é diferente, portanto, a espessura será outra, obtendo diferentes valores em cada faixa de frequência. Desta forma, é possível manipular a frequência para se obter o maior pico de atenuação.

Num ensaio de refletividade, como visto na Figura 5.3, a onda eletromagnética passa pela amostra e reflete pela placa metálica, voltando para a porta 1, possibilitando analisar a refletância da onda. Desta forma, uma amostra porosa, além de passar por este processo, terá múltiplas reflexões, devido seus poros, que dificultam a trajetória da onda. Esse fenômeno influencia diretamente nos resultados deste trabalho, pois é uma das causas do aumento da atenuação eletromagnética.

Tabela 5.1 - Melhores resultados obtidos

Banda	Amostra	Frequência (GHz)	Potencial de atenuação (dB)
Ka	Amostra 5	38,57	-31,65
K	Amostra 4	26,5	-28,42

Figura 5.3 - Esquema de amostra com poros e amostra sem poros.



Fonte: Produção do autor.

6 CONCLUSÃO

Foram desenvolvidas amostras de materiais compósitos magnéticos porosos. A partir do método da cura das amostras à vácuo, nas pressões estabelecidas em -50, -150, -250, -350 e -450 mmHg, percebeu-se que a maior quantidade de poros está presente na concentração de 70% de FC, evidenciando que é possível fazer material compósito com controle de poros para as diversas aplicações na indústria, conforme sua necessidade. O estudo parcial do trabalho também permite enfatizar que o aumento da quantidade de FC melhora a qualidade do processo de porosidade. É possível observar que a metodologia escolhida no presente trabalho até o presente momento possui a capacidade de desenvolver poros de forma controlada em compósitos magnéticos, este resultado evidencia que o presente projeto pode ser continuado como previsto no plano de trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALHARSHAN, G. A. et al. Radiation shielding capacity of Li₂O-SiO₂/GeO₂ glasses doped with rare earth oxides: Nuclear security applications. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 204, 1 mar. 2023.
- ALIKHANI, E.; MOHAMMADI, M.; SABZI, M. Preparation and study of mechanical and thermal properties of silicone rubber/poly(styrene–ethylene butylene–styrene) triblock copolymer blends. **Polymer Bulletin**, v. 80, n. 7, p. 7991–8012, 1 jul. 2023.
- ARSLANAGIĆ, S. et al. **A Review of the Scattering-Parameter Extraction Method with Clarification of Ambiguity Issues in Relation to Metamaterial Homogenization**. [s.l.: s.n.].
- BONALDI, R. R.; SIORES, E.; SHAH, T. Characterization of electromagnetic shielding fabrics obtained from carbon nanotube composite coatings. **Synthetic Metals**, v. 187, n. 1, p. 1–8, 2014.
- HUANG, X. et al. Evolutionary topology optimization of periodic composites for extremal magnetic permeability and electrical permittivity. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 46, n. 3, p. 385–398, set. 2012.
- KARIMI, P.; OSTOJA-STARZEWSKI, M.; JASIUK, I. Experimental and computational study of shielding effectiveness of polycarbonate carbon nanocomposites. **Journal of Applied Physics**, v. 120, n. 14, 2016.
- LOPES, B. **Estudo da capacidade de absorção de onda eletromagnética por particulados de ferrita MnZn e ferro carbonila dispersos em matriz de borracha de silicone na faixa de frequência referente à banda X (8,2-12,4 GHz)**. [s.l.] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2020.
- MARTEL, J. et al. **Influence of electromagnetic fields on the circadian rhythm: Implications for human health and disease**. **Biomedical Journal** Elsevier B.V., , 1 fev. 2023.
- MISHRA, M.; SINGH, A. P.; DHAWAN, S. K. Expanded graphite-nanoferrite-fly ash composites for shielding of electromagnetic pollution. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 557, p. 244–251, 2013.

- PANWAR, V. et al. Electrical, dielectric, and electromagnetic shielding properties of polypropylene-graphite composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 115, n. 3, p. 1306–1314, 2 maio 2010.
- RIUS-BARTRA, J. M. et al. High-consistency silicone rubber with reduced Young's modulus. An industrial option to dielectric silicone rubber. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 140, n. 37, 5 out. 2023.
- SHEN, Y.; LI, Q.; XU, S. Microwave absorption properties of cementitious composites containing carbonyl iron powder (CIP) and fly ash: Formation and effect of CIP core–shell structure. **Cement and Concrete Composites**, v. 131, 1 ago. 2022.
- SHIT, S. C.; SHAH, P. **A review on silicone rubber**. **National Academy Science Letters**, ago. 2013.
- WU, T. et al. 3D Printed Polyimide Nanocomposite Aerogels for Electromagnetic Interference Shielding and Thermal Management. **Advanced Materials Technologies**, v. 8, n. 14, 24 jul. 2023.
- YAO, M. et al. A Study on Exposure to Electromagnetic Fields From User Equipment Antennas Above 100 GHz. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 65, n. 5, p. 1292–1299, 1 out. 2023.
- YU, H. et al. Optimization of multiple attenuation mechanisms by cation substitution in imidazolic MOFs-derived porous composites for superior broadband electromagnetic wave absorption. **Journal of Materials Science and Technology**, v. 176, p. 176–187, 20 mar. 2024.