



Sara Fragoso Pereira

**Caracterização Eletromagnética de Materiais de
Construção Civil Via Medidas de Refletividade
Através do Arco NRL**

**João Pessoa -PB
Agosto de 2022**



Sara Fragoso Pereira

Caracterização Eletromagnética de Materiais de Construção Civil Via Medidas de Refletividade Através do Arco NRL

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Eletromagnetismo Aplicado

Joabson Nogueira de Carvalho, Dr.
Orientador

João Pessoa – PB, agosto de 2022
©Sara Fragoso Pereira – sarafragoso86@gmail.com

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Nilo Peçanha do IFPB, *campus* João Pessoa

P436c Pereira, Sara Fragoso.

Caracterização eletromagnética de materiais de construção civil via medidas de refletividade através do Arco NRL / Sara Fragoso Pereira. – 2022.

81 f. : il.

Dissertação (Mestrado-Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação da Paraíba / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), 2022.

Orientação : Prof^o. D.r Joabson Nogueira de Carvalho.

1. Propagação da onda eletromagnética. 2. Materiais de construção. 3. Refletividade. 4. Arco NRL. 5. Concreto. I. Título.

CDU 621.37(043)

Caracterização Eletromagnética de Materiais de Construção Civil Via Medidas de Refletividade Através do Arco NRL

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como requisito necessário para prosseguimento da pesquisa para a obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 01 / 09 / 2022.

BANCA EXAMINADORA


Joabson Nogueira de Carvalho, Dr. – IFPB
Orientador


Alfrêdo Gomes Neto, Dr. – IFPB
Examinador Interno


Jefferson Costa e Silva, Dr. – IFPB
Examinador Interno


Luiz Guedes Caldeira, Dr.
Examinador Externo

João Pessoa – PB
Agosto de 2022

RESUMO

A capacidade de fornecer comunicação sem fio a uma população vem sendo desenvolvida desde a década de 1950 quando o conceito celular foi apresentado. Desde então os sistemas sem fio e os que utilizam padrões mais novos para muitos outros tipos de tráfego de telecomunicações foram ampliados e chegamos a uma sociedade totalmente conectada em rede fornecendo acesso à informação e compartilhamento de dados em qualquer lugar e a qualquer momento para qualquer pessoa e qualquer coisa (5G).

Esta pesquisa apresenta os resultados do estudo da refletividade de materiais utilizados na construção civil, na faixa de frequências entre 2,5 GHz e 10 GHz, que inclui, dentre outros, a faixa a ser utilizada pelos sistemas LTE-5G no Brasil. Para a medição, foi construído um arco NRL e utilizado o Analisador de Redes Vetorial Agilent N5230A, com antenas impressas do tipo UWB. As medições consideram ainda duas polarizações diferentes, perpendicular e paralela, considerando o sentido do campo elétrico em relação à superfície do material sob teste. Os resultados apontam que, para ângulos rasantes (de incidência 80° com relação a normal) com as antenas na polarização paralela, os materiais apresentam propriedades reflexivas (a refletividade fica próxima a 0 dB). À medida que esse ângulo de incidência diminui com relação a normal, parte da energia é transmitida para o outro meio, parte penetra no material e uma parcela menor de energia é refletida, ocasionando um aumento nos valores da refletividade. Com as antenas na posição perpendicular, os valores da refletividade tendem a diminuir, à medida que o ângulo de incidência com relação a normal diminui.

Palavras-Chave: Refletividade, Arco NRL, Materiais, Concreto, Porcelanato, Gesso.

ABSTRACT

The ability to provide wireless communication to a population has been developed since the 1950 when the cellular concept was introduced. Since then wireless systems and those using newer standards for many other types of telecommunications traffic have expanded and we have come to a fully networked society providing anywhere, anytime access to information and data sharing for anyone and anything (5G).

This research presents the results of the study of the reflectivity of materials used in civil construction, in the frequency range between 2 and 10 GHz, which includes, among others, the range to be used by LTE-5G systems in Brazil. For the measurement, an NRL arc was constructed and the Agilent N5230A Vector Network Analyzer was used, with printed UWB antennas. The measurements also consider two different polarizations, perpendicular and parallel, considering the direction of the electric field in relation to the surface of the material under test. The results indicate that, for grazing angles (of incidence 80° in relation to the normal) with the antennas in parallel polarization, the materials present reflective properties (the reflectivity is close to 0 dB). As this angle of incidence decreases with respect to normal, part of the energy is transmitted to the other medium, part penetrates the material and a smaller part of the energy is reflected, causing an increase in reflectivity values. With the antennas in the perpendicular position, the reflectivity values tend to decrease, as the angle of incidence with respect to the normal decreases.

Keywords: Reflectivity, Arch NRL, Materials, Concrete, Porcelain, Plaster.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Propagação da onda eletromagnética.....	27
Figura 2 - Ondas em interface dielétricas.....	30
Figura 3 - Esquema do Arco NRL.....	35
Figura 4 - Placa produzida de concreto 60 cm x 60 cm utilizada para realização das medições.....	37
Figura 5 - Placa de gesso utilizada como MUT (<i>material under test</i>) nas medições.....	37
Figura 6 - Porcelanato esmaltado 60 cm x 60 cm utilizado nas medições.....	38
Figura 7 - (a) Antenas do tipo UWB (b) Estrutura impressa em PLA para suporte das antenas.....	39
Figura 8 - Suporte confeccionado em madeira para apoio do MUT.....	39
Figura 9 -Montagem utilizada para medidas de refletividade.....	40
Figura 10 - Placa de alumínio 60 cm x 60 cm para a referência de reflexão total.....	41
Figura 11 - Placa de alumínio 60 cm x 60 cm colocada sobre a amostra de concreto ...	43
Figura 12 - Módulo e fase da refletividade para o concreto na polarização paralela – (a) $\theta_i = \theta_r = 80^\circ$; (b) $\theta_i = \theta_r = 70^\circ$; (c) $\theta_i = \theta_r = 60^\circ$; (d) $\theta_i = \theta_r = 50^\circ$; (e) $\theta_i = \theta_r = 45^\circ$; (f) $\theta_i = \theta_r = 40^\circ$; (g) $\theta_i = \theta_r = 30^\circ$; (h) $\theta_i = \theta_r = 20^\circ$; (i) $\theta_i = \theta_r = 10^\circ$	44
Figura 13 - Módulo e fase da refletividade para o concreto na polarização perpendicular – (a) $\theta_i = \theta_r = 80^\circ$; (b) $\theta_i = \theta_r = 70^\circ$; (c) $\theta_i = \theta_r = 60^\circ$; (d) $\theta_i = \theta_r = 50^\circ$; (e) $\theta_i = \theta_r = 45^\circ$; (f) $\theta_i = \theta_r = 40^\circ$; (g) $\theta_i = \theta_r = 30^\circ$; (h) $\theta_i = \theta_r = 20^\circ$; (i) $\theta_i = \theta_r = 10^\circ$	49
Figura 14 - Amostra de gesso com placa de alumínio sobre a amostra, posicionada no centro do Arco NRL.....	54
Figura 15 - Módulo e fase da refletividade para o gesso na polarização paralela – (a) $\theta_i = \theta_r = 80^\circ$; (b) $\theta_i = \theta_r = 70^\circ$; (c) $\theta_i = \theta_r = 60^\circ$; (d) $\theta_i = \theta_r = 50^\circ$; (e) $\theta_i = \theta_r = 45^\circ$; (f) $\theta_i = \theta_r = 40^\circ$; (g) $\theta_i = \theta_r = 30^\circ$; (h) $\theta_i = \theta_r = 20^\circ$; (i) $\theta_i = \theta_r = 10^\circ$	55
Figura 16 - Módulo e fase da refletividade para o gesso na polarização perpendicular – (a) $\theta_i = \theta_r = 80^\circ$; (b) $\theta_i = \theta_r = 70^\circ$; (c) $\theta_i = \theta_r = 60^\circ$; (d) $\theta_i = \theta_r = 50^\circ$; (e) $\theta_i = \theta_r = 45^\circ$; (f) $\theta_i = \theta_r = 40^\circ$; (g) $\theta_i = \theta_r = 30^\circ$; (h) $\theta_i = \theta_r = 20^\circ$; (i) $\theta_i = \theta_r = 10^\circ$	60
Figura 17 - Porcelanato 60 cm x 60 cm posicionado no Arco NRL para as medições..	65
Figura 18 - Módulo e fase da refletividade para o porcelanato na polarização paralela – (a) $\theta_i = \theta_r = 80^\circ$; (b) $\theta_i = \theta_r = 70^\circ$; (c) $\theta_i = \theta_r = 60^\circ$; (d) $\theta_i = \theta_r = 50^\circ$; (e) $\theta_i = \theta_r = 45^\circ$; (f) $\theta_i = \theta_r = 40^\circ$; (g) $\theta_i = \theta_r = 30^\circ$; (h) $\theta_i = \theta_r = 20^\circ$; (i) $\theta_i = \theta_r = 10^\circ$	66

Figura 19 - Módulo e fase da refletividade para o porcelanato na polarização perpendicular – (a) $\theta_i = \theta_r = 80^\circ$; (b) $\theta_i = \theta_r = 70^\circ$; (c) $\theta_i = \theta_r = 60^\circ$; (d) $\theta_i = \theta_r = 50^\circ$; (e) $\theta_i = \theta_r = 45^\circ$; (f) $\theta_i = \theta_r = 40^\circ$; (g) $\theta_i = \theta_r = 30^\circ$; (h) $\theta_i = \theta_r = 20^\circ$; (i) $\theta_i = \theta_r = 10^\circ$

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -Resistência à compressão de alguns cimentos Portland do Brasil.	20
Tabela 2-Exigências físicas e mecânicas do gesso para construção civil.....	22
Tabela 3-Relação entre refletividade e percentual de energia absorvida.	33

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ABC	Associação Brasileira de Cerâmica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
\cos	Cosseno do ângulo
CP-II-F-32	Cimento Portland tipo II com adição de Filer com classe de resistência à compressão de 32 MPa
dB	Decibel
dBi	Ganho da antena
EM	Ondas eletromagnéticas
GHz	Gigahertz = 1×10^9 Hz
GTEMA	Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado
LC	Local de Uso
MHz	Megahertz
MUT	<i>Material Under Teste</i>
NBR	Norma Brasileira
NRL	<i>Naval Reserarch Laboratory</i>
PLA	Poliácido Láctico
P_{inc}	Potência incidente
P_{ref}	Potência refletida
R	Refletividade
RCS	<i>Radar Cross Section</i>
RF	Radiofrequência
\sin	Seno do ângulo
UWB	<i>Ultra Wideband</i>
\tan	Tangente do ângulo
W	Watt (Unidade de potência)
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i> (Rede sem fio local)
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i> (Redes pessoais sem fio)
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i> (Interoperabilidade mundial para acesso de micro-ondas)

\hat{a}_x	Vetor unitário na direção x
\hat{a}_y	Vetor unitário na direção y
\hat{a}_z	Vetor unitário na direção z
c	Velocidade da luz no vácuo $\approx 2,997925 \times 10^8$ em m/s
δ	Ângulo entre dois vetores em graus
$\vec{B} = \vec{b}$	Densidade de fluxo de campo magnético
$\vec{D} = \vec{d}$	Densidade de fluxo de campo elétrico
$\vec{E} = \vec{e}$	Intensidade de campo elétrico
Γ	Coefficiente de reflexão
ϵ	Permissividade elétrica do meio
ϵ_r	Permissividade elétrica relativa
ϵ^*	Permissividade elétrica complexa
ϵ'	Componente real da permissividade elétrica complexa
ϵ''	Componente imaginária da permissividade elétrica complexa
$\vec{H} = \vec{h}$	Intensidade de campo magnético
$\vec{J} = \vec{j}$	Densidade de corrente elétrica
κ	Número de onda
θ_i	Ângulo incidente
θ_r	Ângulo refletido
θ_t	Ângulo transmitido
η	Impedância característica
f	Frequência
f_{ck}	Resistência característica à compressão
λ	Comprimento de onda
μ	Permeabilidade magnética do meio
ρ	Densidade de carga elétrica
σ	Condutividade elétrica do meio
ω	Coefficiente angular em rad/s
T	Coefficiente de transmissão
V_p	Velocidade de propagação da onda
Ω	Ohm

Sumário

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	15
1.1.1 Objetivo Geral	15
1.1.2 Objetivos Específicos	15
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO	17
2.1.1 Concreto	18
2.1.2 Gesso	20
2.1.3 Porcelanato	23
2.2 CARACTERÍSTICAS ELETROMAGNÉTICAS DOS MATERIAIS	25
2.2.1 Conceito de campo	25
2.2.2 Propagação da onda eletromagnética em materiais	26
2.2.3 Ondas em interfaces	30
2.3 MEDIDAS DE REFLETIVIDADE	33
2.4 MÉTODO DO ARCO NRL.....	34
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	36
3.1 PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO	36
3.1.1 Preparação dos materiais	36
3.1.2 Construção do Arco NRL	38
4. RESULTADO DAS SIMULAÇÕES	42
4.1 RESULTADOS PARA O CONCRETO	42
4.2 RESULTADOS PARA O GESSO.....	53
4.3 RESULTADOS PARA O PORCELANATO	64
5. CONCLUSÕES	76
REFERÊNCIAS.....	78

1. INTRODUÇÃO

A capacidade de se comunicar com pessoas em movimento evoluiu bastante desde que se demonstrou a capacidade do rádio de comunicar-se com navios que cruzavam o Canal da Mancha. Isso foi em 1897, e desde então, novos métodos e serviços de comunicações sem fio têm sido desenvolvidos em todo o mundo. Com o passar do tempo, o setor de comunicações via rádio cresceu, alimentado pela nova integração de circuitos em grande escala e outras tecnologias que tornaram os equipamentos portáteis de rádio ainda menores, mais baratos e mais confiáveis. A capacidade de fornecer comunicações sem fio a uma população inteira foi apresentada nas décadas de 1960 e 1970 quando foi finalmente implementado o conceito celular, desenvolvido na década de 1950. Nascia assim a era das comunicações sem fio [1].

O sucesso do celular levou ao desenvolvimento dos sistemas sem fio e de padrões mais novos para muitos outros tipos de tráfego de telecomunicação além das chamadas de voz por telefone móvel. Os sistemas de comunicação móvel evoluíram de suportar apenas voz analógica (2G) a sistemas que fornecem tráfego de dados, com centenas de diferentes aplicativos (3G e 4G) para bilhões de usuários ao mesmo tempo, atendendo às necessidades cada vez maiores desses consumidores [2].

Caminha-se para uma sociedade totalmente conectada em rede que fornecerá acesso à informação e compartilhamento de dados em qualquer lugar e a qualquer momento para qualquer pessoa e qualquer coisa (5G). Assim, no futuro o acesso sem fio não será apenas sobre conectividade para as pessoas, mas para qualquer coisa (objeto ou outros sistemas) que possa estar conectado à internet. Isso inclui eletrodomésticos, controle de tráfego, segurança e monitoramento de sistemas, equipamentos médicos, dentre outros [2].

A evolução dos sistemas de comunicação tem aumentado a demanda de instalações de sistemas *indoor*. As redes *wireless* (ou redes sem fio) têm sido cada vez mais usadas em substituição aos sistemas cabeados dentro de ambientes domésticos, prédios, escritórios, hospitais, escolas, através do desenvolvimento de redes locais. Esses sistemas são utilizados para prover o acesso à internet aos dispositivos de rede ou comunicação móvel em WPAN, WLAN, WiMAX, Wi-Fi, ou em sistemas com tecnologia 3G, 4G e 5G [3].

O aumento das instalações de sistemas *indoor* desencadeou a necessidade do desenvolvimento de ferramentas de predição de campo. Essas ferramentas, entre outras funções, simulam a propagação para compreensão do comportamento de ondas eletromagnéticas em ambientes complexos, tendo como objetivo aumentar a eficiência de comunicação dos diversos sistemas. O uso de tais ferramentas permite uma melhor implantação e manutenção de sistemas de rádio, por exemplo, maximizando seu rendimento e cobertura. A exatidão no resultado está relacionada ao modelamento eletromagnético do ambiente, considerando a interação entre a onda eletromagnética e os diversos materiais que o compõe, como paredes, móveis, portas, janelas, etc. [3], [4].

À vista disso, o conhecimento das propriedades dielétricas dos materiais que compõe o ambiente é significativo para aumentar a precisão das ferramentas de predição de campo. As propriedades dielétricas dos materiais de construção têm sido objeto de pesquisa nos últimos anos. O conhecimento das propriedades dielétricas permite inferir sobre a interação dos campos eletromagnéticos nas fronteiras de materiais, possibilitando o cálculo das quantidades de energia refletidas e/ou transmitidas nos diversos materiais que compõe o cenário. A escolha do método de determinação das características dielétricas depende de fatores como frequência, tipo do material, disponibilidade de equipamentos e precisão requerida [3], [5].

Em fevereiro de 2020 a Agência Nacional de Telecomunicações - ANATEL regulamentou as frequências a serem utilizadas inicialmente nas redes LTE-5G no Brasil, reservando as faixas de 2,3 GHz, 3,5 GHz, 26 GHz, além do espectro remanescente na faixa de 700 MHz. Dessa forma, é imprescindível o conhecimento das propriedades dielétricas dos materiais (paredes, revestimentos, concreto, móveis, dentre outros), ou mesmo de suas propriedades reflexivas, para aumentar a precisão dos modelos de predição e melhorar a eficácia dos projetos dos sistemas. O presente trabalho tem o propósito de contribuir para o estudo e determinação de características de refletividade de alguns materiais usados na construção civil, destacando aqueles empregados na construção de lajes, paredes, cobertas e revestimentos, nas faixas de frequência relacionadas para os sistemas LTE-5G no Brasil.

1.1 OBJETIVOS

Os objetivos do presente trabalho estão divididos em objetivo geral e objetivos específicos.

1.1.1 Objetivo Geral

Realizar a caracterização da refletividade de materiais empregados na construção civil, através da utilização do método do Arco NRL (Naval Research Laboratory), na faixa de frequências entre 2.500 e 10.000 MHz, que inclui, dentre outros, a faixa a serem usadas pelos sistemas LTE-5G no Brasil.

1.1.2 Objetivos Específicos

A partir do objetivo geral apresentado, são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar os materiais de construção civil empregados no ensaio, quanto a sua utilização no setor construtivo, apresentando peculiaridades de cada um;
- Construir o Arco NRL a ser utilizado nas medições;
- Calibrar o Arco NRL para as frequências de interesse;
- Coletar dados de espalhamento de radiação eletromagnética visando conhecer a interação onda/material;
- Caracterizar os materiais de construção ensaiados, quanto a sua refletividade;
- Comparar os resultados experimentais obtidos com os resultados numéricos disponíveis na literatura para os referidos materiais ensaiados;
- Documentar os trabalhos realizados através da publicação de artigos e da defesa de dissertação.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O Capítulo 1 apresenta uma introdução ao trabalho com um breve relato sobre o início das comunicações sem fio e como estas evoluíram até chegar a nova geração dos sistemas móveis, que hoje define-se como “5G”. É exposta a relevância de conhecer as características dos materiais que compõe os ambientes para aumentar a precisão dos projetos de comunicações móveis elevando a eficácia dos sistemas.

O Capítulo 2 discorre sobre os materiais da construção civil utilizados na pesquisa, descrevendo as suas principais propriedades e características, é apresentado alguns dos métodos de caracterização eletromagnética utilizados para uma melhor compreensão dos mecanismos de interação onda-material, bem como as características eletromagnéticas dos materiais.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia operada na pesquisa. Dispõe sobre os materiais utilizados, as ondas eletromagnéticas e suas interações com os meios e discorre sobre os equipamentos e métodos adotados, descreve a construção do Arco NRL e os procedimentos aplicados para obtenção das medidas de refletividade.

No Capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos para as medidas de refletividade utilizando o método do Arco NRL para as polarizações consideradas, bem como apresenta a discussão sobre os resultados.

No Capítulo 5 são apresentadas as considerações finais com as principais conclusões do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta as características dos materiais usados na construção civil e considerados neste estudo. Também são apresentadas as equações do campo eletromagnético e suas interações com os meios de propagação. Por fim, são apresentadas as características de funcionamento do Arco NRL utilizado neste trabalho para caracterização da refletividade dos materiais.

2.1 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Materiais de construção civil são elementos de naturezas diversas, que devem desempenhar papéis específicos e previsíveis de maneira a possibilitar e garantir a existência de um determinado ambiente construído, pensado para um determinado fim - habitação, transporte, lazer, serviços e vários outros. Para que uma construção se materialize todas as etapas, seja ela de concepção, projeto, cálculo, quantificação, obra, ocupação e manutenção, são pensadas e executadas em função dos seus materiais constituintes, o que denota a importância e a necessidade de bem compreendê-los. O conhecimento das características e propriedades dos diversos materiais de construção leva ao emprego adequado dos mesmos, nas várias situações com que se deparam os profissionais. O material deve possuir propriedades que o tornem adequado ao uso que se pretende fazer dele. Entre essas propriedades estão a resistência, a trabalhabilidade, a durabilidade, a higiene e a segurança [6], [7].

Caracterizar tecnologicamente um material é, em sentido amplo, compreendê-lo: quanto às suas propriedades decorrentes da sua natureza, da sua origem, da sua própria constituição; quanto ao seu comportamento quando submetido a certas solicitações (ou simulações); e quanto a certos requisitos técnicos aos quais ele deve atender para cumprir determinadas funções estabelecidas [7].

As propriedades eletromagnéticas dos materiais dizem respeito às suas propriedades físicas e químicas. Assim, a determinação dessas propriedades, permite saber outras características do material, como sua composição, densidade, teor de umidade, porosidade, ductilidade, dentre outras. A determinação de características de materiais a partir de suas propriedades dielétricas pode ser aplicada a uma grande gama de materiais. A permissividade relativa (ϵ_r) é uma das propriedades dielétricas dos materiais presentes em um ambiente que afeta a propagação das ondas eletromagnéticas

(EM) que interagem com esses meios. Associado a outras propriedades eletromagnética, como a permeabilidade magnética (μ) e a condutividade (σ) possibilita o cálculo do campo eletromagnético nos materiais e em suas fronteiras, permitindo também o conhecimento da impedância do meio (η) e a velocidade de propagação da onda naquele material (v). Cada material possui seu próprio conjunto de propriedades que, entre outros parâmetros, dependem da frequência e outros parâmetros físicos, importando na relação entre os sinais incidentes, refratados e refletidos nas fronteiras dos materiais [8], [9].

Para o presente trabalho, três diferentes tipos de materiais de construção foram escolhidos para serem analisados quanto a sua refletividade: o concreto, o gesso (em placa) e o porcelanato. Esses materiais foram pensados levando-se em consideração a sua intensa utilização nos diversos modelos de edificação.

2.1.1 Concreto

O concreto é um dos mais importantes materiais estruturais utilizados na construção civil da atualidade. Mesmo sendo um dos materiais de construção de estruturas mais recentes, pode ser considerado como uma das descobertas mais interessantes da história do desenvolvimento da humanidade [10]. Historicamente, podem-se encontrar registros da utilização de um concreto primitivo obtido da mistura de cal hidratada com argila pozolânica, que o transformava em um material muito durável, mas, ainda, com resistências baixas, comparadas às de hoje, ter sido aplicado em centenas de quilômetros de rodovias e pavimentos do império romano [11].

O concreto da era atual teve sua utilização difundida após a patente do cimento Portland por John Aspdin em 1824 na Inglaterra. O cimento Portland é um produto químico formado pela combinação de cálcio, silício, alumínio, ferro e pequenas quantidades de outros compostos, a exemplo do gesso, que regula o tempo de endurecimento do concreto, e só é adicionado durante a fase final do processamento [10], [11].

De acordo com a Norma Regulamentadora Brasileira 12655 (NBR 12655:2015) o conceito para cimento Portland é:

Cimento Portland: aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland, ao qual se adiciona, durante essa operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a essa mistura materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto-

forno e/ou materiais carbonáticos, nos teores indicados nas normas específicas. (NBR 12655:2015).

No Brasil, a utilização do concreto foi amplamente expandida sendo considerado o material estrutural mais importante na construção civil da primeira metade do século XX, já que no país não existia indústria siderúrgica capaz de produzir perfis estruturais que suprissem as necessidades de demanda nessa área [11], [13].

Sendo um material composto, o concreto é constituído por cimento, água, agregado miúdo (areia), agregado graúdo (pedra ou brita), e ar. A mistura desses materiais, em proporções pré-estabelecidas apresenta-se, nas primeiras horas, em um estado capaz de ser moldado em fôrmas das mais variadas formas geométricas. Com o tempo, a mistura endurece pela reação irreversível da água com o cimento, adquirindo resistência mecânica capaz de torná-lo um material de excelente desempenho estrutural, sob os mais diversos ambientes de exposição. O concreto também pode conter adições (cinza volante, pozolanas, sílica ativa, fibras etc.) e aditivos químicos com a finalidade de melhorar ou modificar suas propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade requeridas, além das características de trabalhabilidade necessárias para o transporte, lançamento e adensamento, condições estas que variam caso a caso [11], [12].

Em comparação ao aço, o concreto não é tão resistente à tração nem tão tenaz quanto este, mas possui excelente resistência à água. As razões para o uso tão difundido do concreto são: a facilidade com que elementos estruturais podem ser executados, numa variedade de formas e tamanhos; mais barato e mais facilmente disponível no canteiro de obra. Ele pode ser fabricado no próprio local da obra (*in loco*), em equipamento específico (betoneira) ou ser pré-misturado (usinado). O concreto usinado é obtido em centrais dosadoras, geralmente chamadas de concreteiras. São instalações preparadas para a produção em escala, constituídas de silos armazenadores, balanças, correias transportadoras e equipamentos de controle. Depois de dosada a mistura é feita no próprio caminhão, durante o trajeto entre a central de concreto e a obra [10], [14].

Quando trabalha em conjunto com o aço, o concreto recebe o nome de “armado”. Essa é uma alternativa, a fim de resolver a dificuldade da fraca resistência à tração do concreto [10]. Nas edificações, o concreto armado é encontrado nos diversos elementos estruturais (lajes, vigas, pilares). A norma NBR 6118:2014 determina os procedimentos básicos para dimensionamento de estruturas de concreto simples (sem armaduras) e armado, não só referente às cargas que os elementos possam suportar, mas também no

que diz respeito à durabilidade das estruturas de concreto, orientando especificações do concreto, em função das condições de agressividade em que a estrutura esteja inserida [10], [14].

Para se projetar estruturas de concreto confiáveis é estipulada uma resistência característica à compressão (f_{ck}), que é definida como valor de referência e adotada como base de cálculo. Esta resistência deve ser atingida até o 28º dia pela estrutura de concreto, devendo ser sistematicamente avaliada, demonstrada e registrada ao longo do processo de produção, para que a estrutura de concreto atenda aos requisitos de segurança.

Na Tabela 1, são apresentados os resultados de resistência à compressão de alguns cimentos nacionais, a 28 dias de idade, no ensaio padronizado que utiliza uma argamassa padrão de traço 1:3, com uma relação água/cimento fixa de 0,48.

Tabela 1 - Resistência à compressão de alguns cimentos Portland do Brasil.

Idade	Resistência à Compressão (28 dias) Mpa					
	CP V ARI	CP II F 32	CP II Z 32	CP II Z 32	CP IV 32	CP III 40
1 dia	21,1	-	-	-	-	-
3 dias	33,6	28,8	25,8	22,6	20,6	21,0
7 dias	40,0	35,0	32,0	28,0	29,8	30,2
28 dias	50,1	43,6	42,3	35,0	42,8	50,2

Fonte: [14]

Este estudo limitou-se à utilização do concreto produzido na região de João Pessoa-PB, com agregados comercializados na região, para o concreto com classe de 30 MPa.

2.1.2 Gesso

Em termos técnicos, pode-se definir gesso como aglomerante-hidráulico, aéreo, de origem mineral, obtido pela calcinação de um minério natural em temperaturas em torno de 150°C, o gipso, que é composto essencialmente da gipsita. Esta é constituída essencialmente por sulfatos de cálcio di-hidratado, geralmente acompanhado de certa proporção de impurezas, como a sílica, alumina, óxido de ferro, carbonatos e magnésio [7].

Os termos “gipsita”, “gipso” e “gesso”, são frequentemente usados como sinônimos. Todavia, a denominação gipsita é reconhecidamente a mais adequada ao mineral em estado natural, enquanto gesso é o termo mais apropriado para designar o produto calcinado [15].

A obtenção do gesso ocorre a partir da desidratação da gipsita em temperaturas apropriadas. Para se chegar ao produto final o gesso passa por um processo de produção que normalmente envolve as seguintes atividades: extração do minério (gipso); britagem; moagem grossa e estocagem com homogeneização; secagem; calcinação; moagem fina; e embalagem [15], [16].

O termo microestrutura é utilizado para descrever as características estruturais encontradas nos materiais. A análise da microestrutura é empregada para explicar diferentes propriedades e, conseqüentemente, diferentes aplicações para esses. A microestrutura da gipsita, em seu estado natural, é constituída de cristais geminados (cristais intercrescem de modo que certas direções do retículo são paralelas) e se apresentam de diversas formas, geralmente prismáticos, grossos, tabulares ou lenticulares, com forte curvatura de faces e arestas. Podem ser encontrados incolor ou nas cores branca, bege ou amarelo, e são considerados minerais brandos, sendo possível riscá-los com a unha. Dentro das suas propriedades físicas destacam-se: a dureza 2 na escala Mohs; a densidade real de 2,35 g/cm³; o índice de refração 1,53 [7], [15]. [17].

O desenvolvimento da resistência mecânica do gesso está relacionado à estrutura cristalina e aos macro-defeitos dos cristais de gipsita. Cristais de gesso bem formados são mais favoráveis para a obtenção de valores mais elevados nas propriedades mecânicas das pastas de gesso. Essas propriedades são responsáveis pela manutenção da integridade dos materiais produzidos das pastas, quando submetidos a esforços, sejam eles de tração, compressão, cisalhamento ou até mesmo impacto e desgaste. Em termos gerais, a fraca resistência mecânica dos produtos à base de gesso, se comparado a outros materiais cimentícios, limitam a utilização desses na construção ao acabamento de paredes e tetos, bem como na fabricação de artefatos para vedação de interiores. A NBR 13207:1994 que fixa as condições exigíveis para o gesso a ser utilizado na construção civil, tanto para fundição quanto para revestimento, indica os valores citados na Tabela 2, para as seguintes propriedades [17], [18].

Tabela 2-Exigências físicas e mecânicas do gesso para construção civil

Determinações Físicas e Mecânicas	Unidade	Limites
Resistência à compressão NBR 12129	MPa	Maior que 8,40
Dureza NBR 12129	N/mm ²	Maior que 30,00

Fonte: Adaptado de [18]

O gesso possui outras características e propriedades bastante interessantes: a trabalhabilidade, a moldabilidade, a aderência ao substrato, isolante térmico e acústico, resistência ao fogo.

A trabalhabilidade significa a facilidade de manuseio por parte do operário que prepara e aplica a argamassa. A plasticidade e a consistência são as propriedades que efetivamente caracterizam a trabalhabilidade. A plasticidade é influenciada pelo teor de ar, pela natureza do aglomerante e pela intensidade de mistura das argamassas. Já a consistência é a propriedade pela qual a pasta tende a resistir às deformações que lhe são impostas no estado fresco [17].

O isolamento térmico de um local consiste basicamente no equilíbrio da temperatura indispensável ao bem-estar do ser humano, obtido mediante a utilização de materiais classificados como de baixa condutibilidade térmica [17]. A condutibilidade térmica do gesso pode variar com a sua densidade, e é aproximadamente igual a 0,3 kcal/m².h.°C, e se comparado a outros materiais de construção, pode ser considerado um ótimo isolante térmico. A propriedade de bom isolante térmico é evidenciada quando o gesso é utilizado no interior das habitações, impedindo a chamada “parede fria”, fenômeno ocasionado pela formação dos indesejáveis vapores de água que surgem sobre a superfície das alvenarias [19].

O gesso possui a capacidade de absorver energia acústica, contribuindo, de diversas maneiras, para a pouca sonoridade dos ambientes. A dissipação de energia sonora processa-se, principalmente, pelo atrito gerado pela passagem do ar através dos poros do material absorvente, o qual deve ser leve, poroso e de baixa densidade [20]. A alta porosidade dos materiais confeccionados com gesso relaciona-se com sua eficiência a ponto de ser considerado um bom isolante acústico [17].

A resistência ao fogo está relacionada à estabilidade e integridade dos elementos que constituem uma edificação quando sujeitos à elevação de temperatura. O bom desempenho do gesso contra a ação do fogo deve-se, sobretudo, ao fato de tratar-se de um material mineral, incombustível, sendo este considerado um dos materiais de construção com melhor resistência a deterioração pela ação do fogo [17], [20].

Na indústria da construção civil, o gesso é muito utilizado em revestimentos, na fabricação de cimento e na manufatura de pré-moldados e adornos. O uso do gesso como material de construção vem sendo intensificado, devido principalmente ao fator socioeconômico, na medida em que é um produto que tem atendido às expectativas dos usuários e construtores, pois proporciona uma maior velocidade de aplicação e, por consequência, ajusta-se melhor aos apertados cronogramas de execução das obras, a um preço competitivo. Nesse sentido, as tendências mais notáveis nas edificações relacionam-se ao emprego de sistemas total ou parcialmente pré-fabricados, capazes de maximizar o potencial de racionalização embutido nos processos construtivos [15], [17].

Para esta pesquisa, será limitada a caracterização do gesso em forma de placa. As placas para forro destacam-se por proporcionarem um fechamento rápido, de fácil execução, e que permite acesso para a manutenção das instalações elétricas e hidráulicas, são geralmente encontradas no mercado brasileiro na dimensão de $60\text{ cm} \times 60\text{ cm}$.

2.1.3 Porcelanato

Segundo a norma NBR 15463:2007, porcelanatos são placas cerâmicas para revestimento constituídas por argilas, feldspatos e outras matérias primas inorgânicas. É um revestimento cerâmico. Ele se diferencia de outras opções por conta do seu processo de fabricação, que utiliza matérias-primas nobres e alta temperatura para a composição da sua massa. São utilizados para revestir pisos e paredes, podendo ser conformados por prensagem, extrusão ou por outros processos. O porcelanato é a tendência atual em produto cerâmico para revestimento que apresenta características técnicas e estéticas distintas das demais cerâmicas esmaltadas tradicionais. O processo de fabricação com elevado grau de moagem, alto teor de matérias-primas fundentes e alta densificação após a queima, resulta em produtos com baixa porosidade e elevado grau de desempenho técnico [21], [22].

O porcelanato é um revestimento cerâmico que se caracteriza principalmente por possuir uma porosidade baixa em relação a outros produtos cerâmicos, apresentando uma absorção de água inferior a 0,5% conforme a NBR 13818:2020 [22]. Ele pode ser considerado um material no qual a associação entre a tecnologia de produção e as propriedades físico-mecânicas como densidade, resistência à flexão, dureza e resistência ao desgaste, é excelente. Estas características permitem a sua utilização em ambientes externos e internos garantindo uma alta confiabilidade e resistência a vários tipos de condições adversas [22].

O porcelanato assemelha-se à pedra natural, mas com características superiores ao desempenho de mármore, granito, pedras entre outros. Para melhorar suas características estéticas e sua posição competitiva em relação às pedras naturais, estes produtos são submetidos a um processo de polimento, que atualmente é amplamente difundido nas indústrias cerâmicas em todo o mundo. Ao longo do processo de polimento ocorrem três principais transformações na peça: a perda de massa, o aumento do brilho e diminuição da rugosidade do porcelanato. O polimento de um porcelanato é um processo específico e muito custoso. Nele ocorre a eliminação do material devido principalmente a processos de fratura frágil que são provocados por esforços sofridos na superfície da peça. Esta eliminação provoca um decréscimo em torno de 10% da espessura da peça, produzindo uma superfície lisa e de alto brilho [22], [23], [24].

Entre os principais tipos apontamos o porcelanato técnico que além de ter alta resistência mecânica possui como principal característica não receber esmalte na superfície e ser retificado, ou seja, possui o acabamento das bordas totalmente reto, com o objetivo de diminuir a aparência do rejunte entre as placas. Destaca-se também o porcelanato esmaltado que assim como o técnico, possui alta resistência mecânica. A diferença, é que ele recebe uma camada de esmalte na superfície, podendo apresentar a borda retificada ou levemente arredondada.

Na pesquisa, utilizou-se uma peça de porcelanato esmaltado $60\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ e 8 mm de espessura com a indicação de local de uso LC - médio tráfego utilizado em ambientes comerciais sem acesso para áreas externas e todos os ambientes residenciais.

2.2 CARACTERÍSTICAS ELETROMAGNÉTICAS DOS MATERIAIS

2.2.1 Conceito de campo

Pode-se entender por campo como sendo um conjunto de valores assumidos por uma quantidade física em vários pontos de uma região do espaço, em vários instantes de tempo. Tanto a região do espaço como os intervalos de tempo podem ser finitos ou infinitos em extensão. Uma teoria física de campo é composta de leis físicas que fornecem as relações entre os campos fontes e os resultantes. A teoria eletromagnética é uma teoria de campo, cujas leis válidas são representadas pelas Equações de Maxwell [25], [26].

Na forma diferencial, as equações de Maxwell que caracterizam o campo eletromagnético clássico são as Equações (1), (2), (3) e (4).

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega B \Leftrightarrow \nabla \times \vec{e} = -\frac{\partial \vec{d}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + j\omega \vec{D} \Leftrightarrow \nabla \times \vec{h} = -\frac{\partial \vec{d}}{\partial t} + \vec{j} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \Leftrightarrow \nabla \cdot \vec{d} = \rho \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \Leftrightarrow \nabla \cdot \vec{b} = 0 \quad (4)$$

onde:

$\vec{E} = \vec{e}$ = intensidade de campo elétrico, em volts por metro;

$\vec{H} = \vec{h}$ = intensidade de campo magnético, em ampère por metro;

$\vec{D} = \vec{d}$ = densidade de fluxo de campo elétrico, em coulomb por metro quadrado;

$\vec{B} = \vec{b}$ = densidade de fluxo de campo magnético, em weber por metro quadrado;

$\vec{J} = \vec{j}$ = densidade de corrente elétrica, em ampère por metro quadrado;

ρ = densidade de carga elétrica, em coulomb por metro cúbico

As relações constitutivas estabelecem ligações entre as funções vetoriais de campo e de densidade de campo. Os meios nos quais os fenômenos eletromagnéticos se

processam são caracterizados no domínio da frequência por valores de permissividade (ϵ), permeabilidade (μ) e condutividade elétrica (σ). Os parâmetros ϵ e μ são constantes complexas características do meio onde se propaga a onda eletromagnética [25], [27] Assim têm-se as Equações (5), (6) e (7).

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (5)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (6)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (7)$$

onde:

ϵ = permissividade, em faraday por metro;

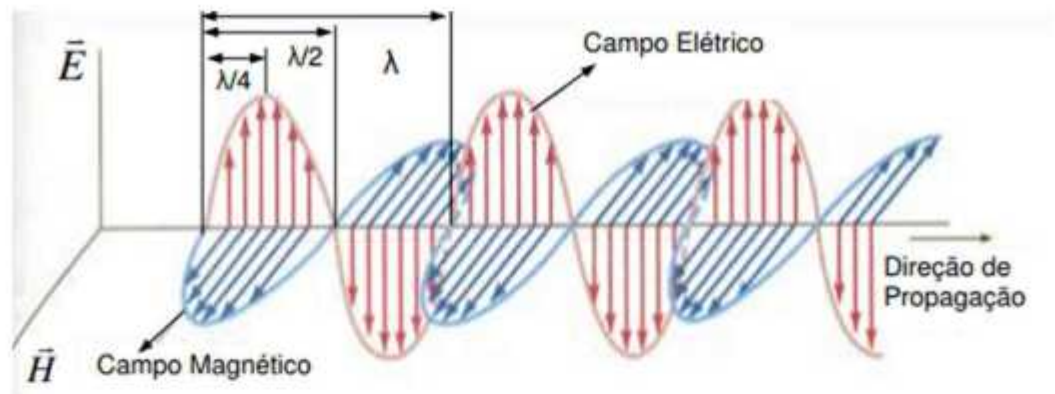
μ = permeabilidade, em henry por metro;

σ = condutividade elétrica, em Siemens por metro.

2.2.2 Propagação da onda eletromagnética em materiais

Uma onda do campo eletromagnético (Figura 1) é formada por campos elétricos (\vec{E}) e magnéticos (\vec{H}), se propagando no espaço livre com uma velocidade de aproximadamente 3×10^8 m/s, ou seja, a velocidade da luz (c). A onda eletromagnética tem comprimentos de onda (λ) diferentes, variando de acordo com a frequência, sendo que λ é inversamente proporcional à frequência (f), ou seja, $\lambda = c/f$. À medida que a frequência diminui, o comprimento de onda aumenta [25], [27], [28].

Figura 1 - Propagação da onda eletromagnética



Fonte: Adaptado de [25]

A propagação da onda eletromagnética em um meio é função da permissividade (ϵ), e permeabilidade complexa deste meio (μ). [25], [27]. Quando uma onda EM (eletromagnética) incide em um meio, parte dessa onda é transmitida (coeficiente de transmissão) e parte é refletida (coeficiente de reflexão), o comprimento e a velocidade da onda que interage com o material são menores que o comprimento e a velocidade da onda no espaço livre, considerando que no material sempre há alguma perda [25], [28].

As características elétricas e magnéticas do meio são determinadas pela permissividade elétrica do meio (ϵ), pela permeabilidade magnética do meio (μ) e pela condutividade elétrica do meio (σ). A permissividade elétrica de um meio indica o quanto esse meio afeta e é afetado por um campo elétrico. A permeabilidade magnética de um meio indica o quanto esse meio afeta e é afetado por um campo magnético. No caso da condutividade é definida como a capacidade dos materiais de conduzirem uma corrente elétrica [29].

Para um meio qualquer, define-se a sua impedância característica como sendo a relação entre as intensidades dos campos elétrico e magnético. Em termos dos parâmetros eletromagnéticos do meio, a sua impedância é dada por:

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad [\Omega] \quad (8)$$

Para uma onda eletromagnética com frequência (f), propagando num meio de impedância (η) o comprimento de onda (λ) está relacionado com a velocidade de propagação:

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi V_p}{\omega} = \frac{V_p}{f} \quad (9)$$

onde:

k = número de onda

V_p = velocidade de propagação da onda;

ω = frequência da onda.

A velocidade de propagação da onda para um meio qualquer, obedece à relação:

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \quad [m/s] \quad (10)$$

Para efeito de comparação dos diferentes tipos de materiais encontrados na natureza, estabeleceu-se como referência a ausência total de material, ou seja, o que se chama de vácuo (também conhecido como espaço livre). Para o espaço livre, a velocidade de propagação da onda eletromagnética é dada por:

$$V_p = c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \varepsilon_0}} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (11)$$

Na Equação (11), temos $\mu_0 = 4,7 \times 10^{-7}$ [H/m] e $\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ [F/m] como valores da permeabilidade magnética e permissividade elétrica respectivamente.

Quando consideramos um meio com perdas, ou seja, a condutividade elétrica é diferente de zero ($\sigma \neq 0$), a permissividade (ε) e a permeabilidade do meio (μ) se tornam quantidades complexas. Estas características têm influência na reflexão das ondas (em fronteiras) e na atenuação das ondas no interior dos materiais [25], [27], [29]. A permissividade é a propriedade do material que relaciona a sua interação com o campo elétrico. No domínio da frequência, a permissividade relativa do material assume um valor complexo, seu valor é apresentado relativamente ao valor da permissividade do vácuo, e vale:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (12)$$

onde:

ϵ^* = permissividade complexa relativa;

ϵ' = constante dielétrica;

ϵ'' = fator de perdas dielétricas.

A parte real (ϵ') da Equação (12) está relacionada à capacidade do material armazenar a energia em resposta a um campo elétrico aplicado. A parte imaginária (ϵ'') está relacionada a perda dielétrica, que converte parte da energia transportada pela onda em calor. O sinal negativo da parte imaginária é relacionado à conversão da energia. Materiais sem perdas têm $\epsilon'' = 0$ [25], [27].

A permissividade complexa (ϵ^*) sugere que os valores da constante dielétrica (ϵ') e fator de perdas dielétricas (ϵ'') são ortogonais. O ângulo entre eles representa a defasagem conhecida como “tangente de perdas” ($\tan \delta$) é um importante estimador das características dielétricas do meio. A tangente de perdas representa a razão entre a energia perdida e a energia armazenada por ciclo do campo externo aplicado [25], [27]. Em termos numéricos, a tangente de perdas é representada por:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (13)$$

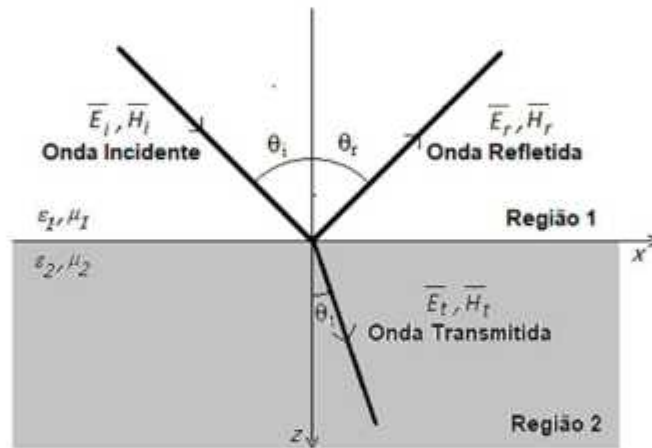
A tangente de perdas do material relaciona a perda dielétrica associada ao campo que atravessa o material com a capacidade do mesmo de armazenar energia. Em geral, os materiais dielétricos são caracterizados pela especificação da permissividade relativa (valor real da quantidade ϵ') e da tangente de perdas numa determinada frequência. Materiais sem perdas possuem a parte imaginária da permissividade nula, restando apenas a constante dielétrica para caracterizar o material [25], [27].

A propagação de uma onda eletromagnética é controlada pelas propriedades elétricas e magnéticas de um meio de propagação e também da frequência do campo aplicado. Essas propriedades são afetadas por outros fatores, como a composição do material, temperatura, forma e a frequência de oscilação do campo eletromagnético [25].

2.2.3 Ondas em interfaces

O comportamento das ondas eletromagnéticas ao incidir na interface entre dois meios dielétricos é descrito pelas Equações de Maxwell, pela geometria e pelas propriedades eletromagnéticas dos materiais. Para uma incidência oblíqua à normal da superfície, são consideradas duas situações para estabelecer as condições de contorno na fronteira: (i) quando o vetor campo elétrico da onda incidente é paralela ao plano que contém a interface (polarização paralela) e (ii) quando o vetor campo elétrico da onda incidente é normal ao plano que contém a interface de separação entre os meios (polarização perpendicular). Para meios dielétricos, a geometria é mostrada na Figura 2.

Figura 2 - Ondas em interface dielétricas



Fonte: Adaptado de [27]

i. Polarização Paralela.

A polarização paralela é definida para o caso em que o vetor campo elétrico está no plano xz . As componentes incidentes do campo são dadas pela solução harmônica da Equação de Campo mostradas nas Equações (14) e (15).

$$\vec{E}_i = E_0(\hat{a}_x \cos\theta_i - \hat{a}_z \sin\theta_i)e^{-jk_1(x \sin\theta_i + z \cos\theta_i)} \quad (14)$$

$$\vec{H}_i = \frac{E_0}{\eta_1} \hat{a}_y e^{-jk_1(x \sin\theta_i + z \cos\theta_i)} \quad (15)$$

Onde $k_1 = \omega\sqrt{\mu_0\varepsilon_1}$ é a constante de propagação para o meio 1 em [rad/m] e $\eta_1 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_1}$ é a impedância vista pela onda no meio 1, dada em [Ω]. Os sinais refletidos e transmitidos na interface são dados em função dos coeficientes de reflexão (Γ) e transmissão (T), respectivamente. As componentes de campo em cada região são descritas pelas Equações (17) e (19) [27].

$$\bar{E}_r = E_0\Gamma(\hat{a}_x\cos\theta_r + \hat{a}_z\sin\theta_r)e^{-jk_1(x\sin\theta_r - z\cos\theta_r)} \quad (16)$$

$$\bar{H}_r = \frac{-E_0\Gamma}{\eta_1}\hat{a}_ye^{-jk_1(x\sin\theta_r - z\cos\theta_r)} \quad (17)$$

$$\bar{E}_t = E_0T(\hat{a}_x\cos\theta_t - \hat{a}_z\sin\theta_t)e^{-jk_2(x\sin\theta_t + z\cos\theta_t)} \quad (18)$$

$$\bar{H}_t = \frac{E_0T}{\eta_2}\hat{a}_ye^{-jk_2(x\sin\theta_t + z\cos\theta_t)} \quad (19)$$

Sendo $k_2 = \omega\sqrt{\mu_0\varepsilon_2}$ a constante de propagação para a região 2, dada em [rad/m] e $\eta_2 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_2}$ é a impedância vista pela onda no meio 2, dada em [Ω]. Os valores para os coeficientes de reflexão e transmissão são função das impedâncias dos meios e também dos ângulos de incidência e transmissão, apresentados nas Equações (20) e (21) [27].

$$\Gamma = \frac{\eta_2\cos\theta_t - \eta_1\cos\theta_i}{\eta_2\cos\theta_t + \eta_1\cos\theta_i} \quad (20)$$

$$T = \frac{2\eta_2\cos\theta_i}{\eta_2\cos\theta_t + \eta_1\cos\theta_i} \quad (21)$$

ii. Polarização Perpendicular

A polarização perpendicular é definida para o caso em que o vetor campo elétrico é normal ao plano xz . As componentes incidentes do campo são dadas pela solução harmônica da Equação de Campo mostradas nas Equações (22) e (23).

$$\bar{E}_i = E_0\hat{a}_ye^{-jk_1(x\sin\theta_i + z\cos\theta_i)} \quad (22)$$

$$\bar{H}_i = \frac{E_0}{\eta_1}(-\hat{a}_x\cos\theta_i + \hat{a}_z\sin\theta_i)e^{-jk_1(x\sin\theta_i + z\cos\theta_i)} \quad (23)$$

Onde $k_1 = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_1}$ é a constante de propagação para o meio 1 em [rad/m] e $\eta_1 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_1}$ é a impedância vista pela onda no meio 1, dada em [Ω]. Da mesma forma que na polarização paralela, os sinais refletidos e transmitidos na interface são dados em função dos coeficientes de reflexão (Γ) e transmissão (T), respectivamente. As componentes de campo em cada região são descritas pelas Equações (25) e (27) [27].

$$\bar{E}_r = E_0\Gamma\hat{a}_y e^{-jk_1(x\text{sen}\theta_i - z\text{cos}\theta_i)} \quad (24)$$

$$\bar{H}_r = \frac{E_0\Gamma}{\eta_1} (\hat{a}_x\text{cos}\theta_r + \hat{a}_z\text{sen}\theta_r) e^{-jk_1(x\text{sen}\theta_r - z\text{cos}\theta_r)} \quad (25)$$

$$\bar{E}_t = E_0T\hat{a}_y e^{-jk_2(x\text{sen}\theta_t + z\text{cos}\theta_t)} \quad (26)$$

$$\bar{H}_t = \frac{E_0T}{\eta_2} (\hat{a}_x\text{cos}\theta_t + \hat{a}_z\text{sen}\theta_t) e^{-jk_2(x\text{sen}\theta_t - z\text{cos}\theta_t)} \quad (27)$$

Assim como para a região 1, os valores da constante dielétrica e impedância do meio para a região 2 são dadas respectivamente, por $k_2 = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_2}$ e $\eta_2 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_2}$. Como no caso da polarização paralela, os valores para os coeficientes de reflexão e transmissão são função das impedâncias dos meios e também dos ângulos de incidência e transmissão [27], dadas pelas Equações (28) e (29).

$$\Gamma = \frac{\eta_2\text{cos}\theta_i - \eta_1\text{cos}\theta_t}{\eta_2\text{cos}\theta_i + \eta_1\text{cos}\theta_t} \quad (28)$$

$$T = \frac{2\eta_2\text{cos}\theta_i}{\eta_2\text{cos}\theta_i + \eta_1\text{cos}\theta_t} \quad (29)$$

Portanto, a polarização muda a aplicação das condições de contorno para o problema, implicando diretamente na quantidade de energia refletida na interface entre dielétricos. Esse valor está diretamente relacionado com a refletividade do material, definida como a redução da potência refletida causada pela introdução do material. A redução de potência é comparada à potência refletida totalmente (reflexão perfeita), causada por um material condutor de mesma dimensão. Dessa forma, espera-se valores diferentes de refletividade do mesmo material para cada polarização considerada [27].

2.3 MEDIDAS DE REFLETIVIDADE

Nas aplicações de radar, a determinação da eficiência da atenuação da radiação incidente por um objeto ou um determinado material é realizada envolvendo medidas da densidade de fluxo de energia do campo espalhado pelo material na direção do receptor do radar. Quando essa avaliação envolve a interação geometria/material é denominada de Seção Reta Radar (*Radar Cross Section –RCS*). A RCS do objeto é uma função que relaciona a potência espalhada em uma determinada direção e a densidade de potência incidente e é expresso em unidades de área (m^2) [30].

Quando uma onda eletromagnética se propaga e encontra algum objeto com propriedades dielétricas distintas do meio de propagação, ondas secundárias são produzidas. Estas decorrem do campo de reação dos dipolos magnéticos e elétricos constituintes do objeto ao campo incidente, o que culmina em ondas refletidas de volta para o meio, e ondas transmitidas para o interior do objeto. Dependendo da forma geométrica do obstáculo, de sua dimensão relativamente ao comprimento de onda e da região ocupada pelo feixe de radiação incidente, bem como da composição e homogeneidade do objeto, pode ocorrer ou não espalhamento difuso, ou seja, reflexão e transmissão ao longo de várias direções [28], [31].

A refletividade é a relação entre a energia eletromagnética refletida e a energia incidente no material quando comparada à reflexão total. A atenuação da refletividade é medida em dB. De acordo com a Enciclopédia Internacional de Compósitos (1991), essa relação entre a atenuação e a energia absorvida ou transmitida por um material pode ser vista na Tabela 3 [32].

Tabela 3-Relação entre refletividade e percentual de energia absorvida.

Atenuação da Refletividade, dB	% da Energia Absorvida
0	0
-1	20,6
-2	37
-3	50
-6	75
-10	90

-15	96,9
-20	99
-30	99,9
-40	99,99

Fonte: Adaptado de [32].

Pode ser observado, pela Tabela 3 que em 20 dB de redução de refletividade, tem-se o equivalente a 99% de absorção da energia incidente. Para cálculo da porcentagem de energia absorvida utilizamos a Equação (30) que envolve a medida de refletividade (R) [32].

$$R (dB) = 10. \log \frac{P_{ref}}{P_{inc}} \quad (30)$$

2.4 MÉTODO DO ARCO NRL

O método do arco NRL (*Naval Research Laboratory*), foi concebido inicialmente no Laboratório de Pesquisa Naval dos Estados Unidos da América na década de 1950, como um meio de avaliar materiais quanto sua refletividade quando incidido por uma onda eletromagnética em determinada faixa de frequência. A técnica do arco NRL consiste de uma medida estática e o arco é basicamente constituído de uma estrutura de madeira que permite fixar um par de antenas em uma variedade de ângulos. O material a ser caracterizado é posicionado sobre um pequeno pedestal no centro de curvatura do arco [33], [34].

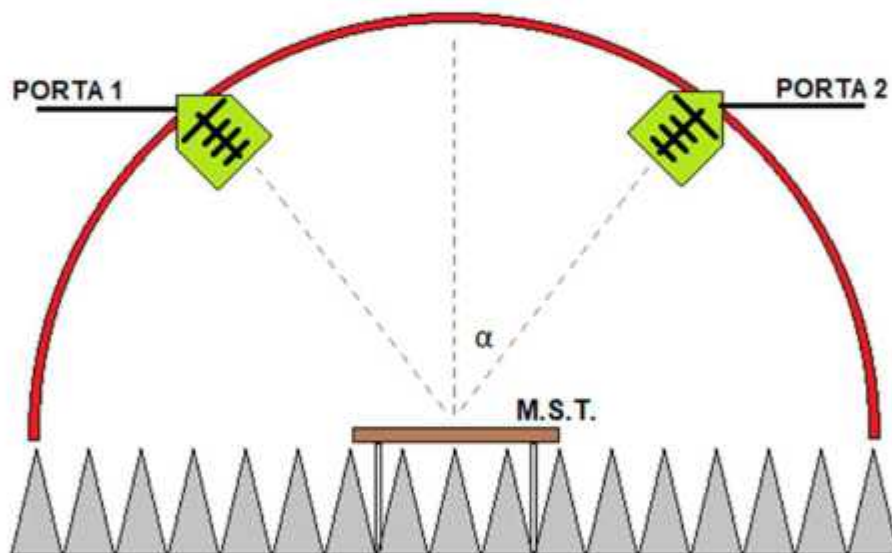
A estrutura do arco é projetada de modo a manter a antena sempre apontada para o centro do corpo de prova em teste, não importando onde essa estrutura seja posicionada. As antenas transmissora e receptora podem ficar próximas, mas a distância mínima deve equivaler à abertura de uma corneta em uso, de modo a reduzir as interferências, devido aos lóbulos laterais da radiação. O material em teste é colocado no centro geométrico do arco. A radiação emitida é obtida em um gerador de sinais com uma saída de amplitude modulada, passando essa por um atenuador, sendo em seguida transmitida pelo uso de uma antena emissora. O sinal após incidir na amostra pode ser atenuado ou não sendo o sinal refletido capturado pela antena receptora e entregue para um detector [34].

As antenas são posicionadas sobre um arco, onde o material sob teste é colocado no centro deste. O arco permite também a variação angular da posição das antenas. O ângulo de incidência e reflexão é sempre relativo à normal em relação ao plano da amostra. A montagem também permite alterar a polarização da antena.

Para reduzir o ruído e as múltiplas reflexões causadas pelo ambiente, foram inseridas estruturas absorvedoras com refletividade de até 20 dB na faixa de interesse. A Figura 3 mostra o diagrama da montagem.

As antenas são conectadas às portas de um Analisador de Redes Vetorial. A calibração é realizada com o uso de uma superfície plana metálica de mesmas dimensões da amostra do material sob teste.

Figura 3 - Esquema do Arco NRL.



Fonte: de autoria própria

De maneira sucinta, para a realização das medidas de refletividade através do arco NRL, faz-se necessário inicialmente realizar a medida de refletividade de uma placa de metal utilizada como referência e em seguida o material em teste é colocado no mesmo local da placa. O resultado do índice de refletividade (atenuação do sinal incidente) será a diferença entre a medida da placa de referência e a da amostra de material em avaliação. A limitação de uso da técnica do arco NRL, é a dificuldade para se medir a fase relativa do sinal refletido, essa técnica é empregada apenas para caracterizar diretamente a amplitude de reflexão [33], [34].

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Esta seção apresenta os procedimentos, materiais e métodos empregados na construção do Arco NRL, preparação das amostras e técnicas de medições empregadas na medição da refletividade dos materiais de interesse

3.1 PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO

3.1.1 Preparação dos materiais

Para determinar as características dielétricas dos materiais, foi inicialmente selecionado e preparado um conjunto de amostras, de forma a satisfazer as condições necessárias do equipamento relativo ao formato das mesmas, que deve ser o mais plano possível [25]. Dependendo da composição, os materiais possuem características diferentes, isso está relacionado ao material do qual se originam (mineral ou vegetal), também podem variar a característica de acordo com o tipo de matéria prima utilizado na sua produção [29].

Os materiais selecionados foram escolhidos dentre os mais comuns aplicados na construção civil, incluem; concreto convencional sem adição de aditivos; gesso (em placa), utilizado para revestimento de teto e o porcelanato cerâmico.

O concreto utilizado para confecção de uma placa (Figura 4) com dimensões $60\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ e 4 cm de espessura foi produzido em uma concreteira da cidade de João Pessoa-PB e transportado em caminhão betoneira com cimento CP II – F-32, agregados comercializados na região, sendo o agregado miúdo areia “grossa” e o agregado graúdo brita 1, com um fator a/c (água/cimento) de 0,50 apresentando f_{cK} de 30 MPa. A placa de concreto construída para a medição é apresentada na Figura 4.

Figura 4 - Placa produzida de concreto 60 cm x 60 cm utilizada para realização das medições.



Fonte: de autoria própria

O gesso usado como MUT (*Material Under Test*) é em forma de placa com dimensão 60 cm x 60 cm e 3 cm de espessura (Figura 5), adquirido em loja específica na cidade de João Pessoa-PB que comercializa o produto. A placa de gesso utilizada é mostrada na Figura 5.

Figura 5 - Placa de gesso utilizada como MUT (*material under test*) nas medições.

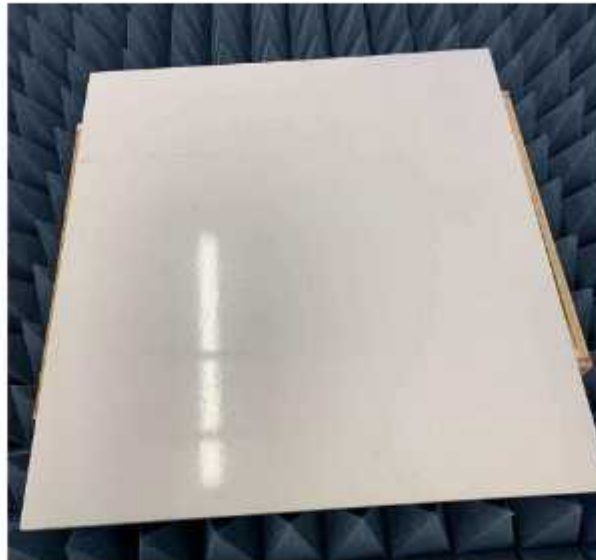


Fonte: de autoria própria

O porcelanato manipulado é do tipo esmaltado com dimensão 60 cm x 60 cm e 8 mm de espessura com a indicação de local de uso LC - médio tráfego utilizado em ambientes comerciais sem acesso para áreas externas e todos os ambientes residenciais,

tendo sido também adquirido em loja específica de João Pessoa-PB que comercializa o produto. A Figura 6 apresenta a amostra de porcelanato utilizado no presente trabalho.

Figura 6 - Porcelanato esmaltado 60 cm x 60 cm utilizado nas medições.



Fonte: de autoria própria

Para cada tipo de material, adotou-se uma mesma dimensão de $60\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ e a medição em frequência realizada específica variou de 2,5 GHz a 10 GHz, que corresponde à largura de banda da antena utilizada

3.1.2 Construção do Arco NRL

Foi montado no Laboratório do Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado - GTEMA/IFPB, um arco NRL, proposto inicialmente pelo *Naval Research Laboratory* (NRL) [35], [36]. O arco foi construído com dupla estrutura de tubos galvanizados e possui diâmetro de 1,93 m. As antenas são do tipo UWB (*ultra wideband*), banda larga direcional de alto ganho, com faixa de frequência 2,4 GHz a 10,5 GHz, dimensões $100\text{ mm} \times 85\text{ mm}$, modo de polarização linear, ganho avaliado de 7 dBi, perda de retorno de 10 dB, capacidade de potência de 8 W. As antenas são suportadas por uma carruagem impressa em PLA (poliácido láctico) que desliza sobre o arco. Figura 7 (a) e 7 (b).

Figura 7 - (a) Antenas do tipo UWB (b) Estrutura impressa em PLA para suporte das antenas.



Fonte: de autoria própria

As antenas, uma transmissora e outra receptora são posicionadas sobre o arco, o material sob teste (MUT) é colocado no centro da estrutura sobre um suporte de madeira confeccionado com dimensões $64\text{ cm} \times 41\text{ cm}$ e 21 cm de altura. Figura 8. A superfície em torno do local da amostra foi totalmente preenchida com absorvedores de rádio frequência (RF).

Figura 8 - Suporte confeccionado em madeira para apoio do MUT



Fonte: de autoria própria

A Figura 9 mostra a montagem utilizada para a medição. O arco permite também a variação angular da posição das antenas. O ângulo de incidência e reflexão é sempre relativo à normal em relação ao plano da amostra. A montagem também permite alterar a polarização da antena. As antenas são conectadas às portas de um Analisador de Redes Vetorial Agilent N5230A.

Figura 9 -Montagem utilizada para medidas de refletividade



Fonte: de autoria própria

A calibração é realizada com o uso de uma superfície plana de alumínio com as mesmas dimensões da amostra do material sob teste, no caso, $60\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ e 1 mm de espessura. A placa metálica fornece a referência de reflexão total. Para simular a onda perdida que não é refletida (o nível de reflexão zero) são deixados apenas os absorvedores. Na Figura 10 podemos observar a placa de alumínio posicionada sobre o material em teste.

Figura 10 - Placa de alumínio 60 cm x 60 cm para a referência de reflexão total



Fonte: de autoria própria

A estrutura montada do arco foi utilizada para medir a refletividade das amostras de concreto, gesso e porcelanato, considerando as polarizações paralela e perpendicular, nas frequências entre 2.5 GHz a 10 GHz, que envolvem a faixa utilizada pelos sistemas celular 5G (nas bandas abaixo e acima de 6 GHz) e também outros serviços, como os protocolos de wi-fi 802.11 (g, n, ac).

4. RESULTADO DAS SIMULAÇÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos para as medidas de refletividade dos materiais. Para a medição, foi utilizado o setup de medição mostrado na Figura 9. A frequência utilizada compreende a faixa de 2,5 GHz a 10 GHz, que contém as frequências de interesse para esta pesquisa, além da faixa prevista para a próxima geração dos sistemas de comunicações móveis de quinta geração, que devem funcionar em 6,5 GHz.

Foram consideradas duas situações:

(a) quando o vetor campo elétrico da onda incidente é paralela ao plano que contém a interface (polarização paralela);

(b) quando o vetor campo elétrico da onda incidente é normal ao plano que contém a interface de separação entre os meios (polarização perpendicular).

O Arco NRL, descrito no Capítulo 3, foi empregado para obtenção das medidas de refletividade. Os valores da refletividade para cada caso foram obtidos pela diferença da potência refletida totalmente (reflexão perfeita), causada por um plano condutor e a potência refletida causada pela introdução do material sob teste de mesma dimensão. Os valores para a fase foram adquiridos pela diferença entre a fase do sinal refletido pelo plano condutor e a fase do sinal refletido pelo material introduzido durante as medições.

Para cada resultado são apresentadas as curvas de regressão para os valores da refletividade (módulo e fase). Foi considerado uma regressão logarítmica em todos os casos.

4.1 RESULTADOS PARA O CONCRETO

As medidas para o concreto foram realizadas considerando uma amostra de concreto com classe de resistência de 30 Mpa, de dimensões 60 cm × 60 cm e 4 cm de espessura colocada no centro do arco NRL. Como referência foi considerado uma placa de alumínio de mesma dimensão, colocada sobre a amostra de concreto, Figura 11.

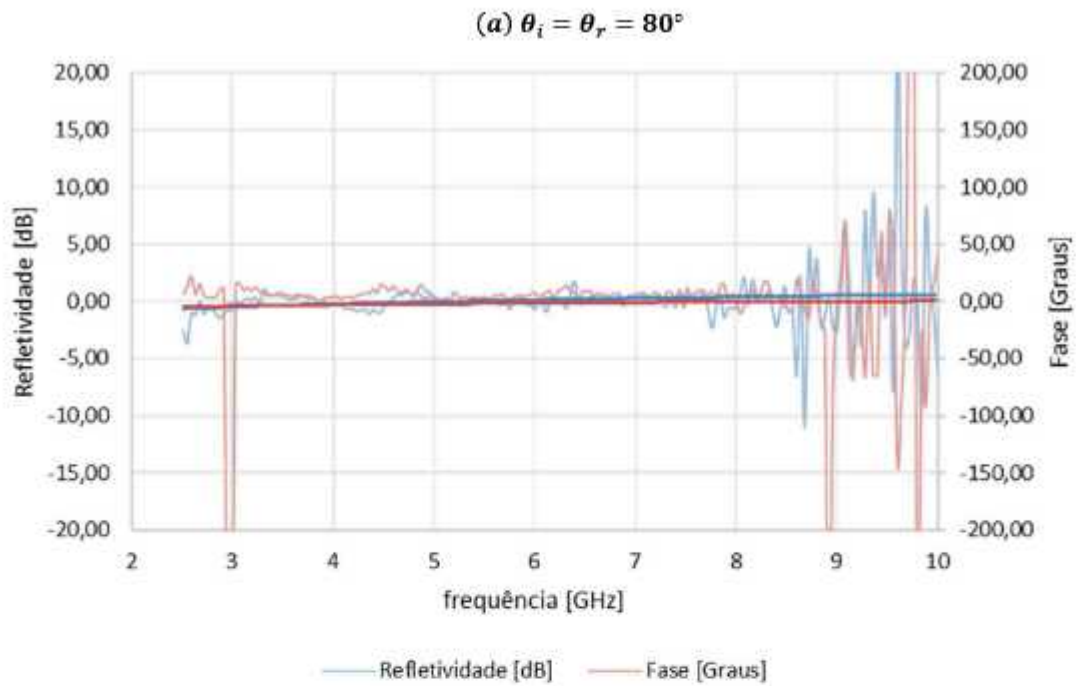
Figura 11 - Placa de alumínio 60 cm x 60 cm colocada sobre a amostra de concreto



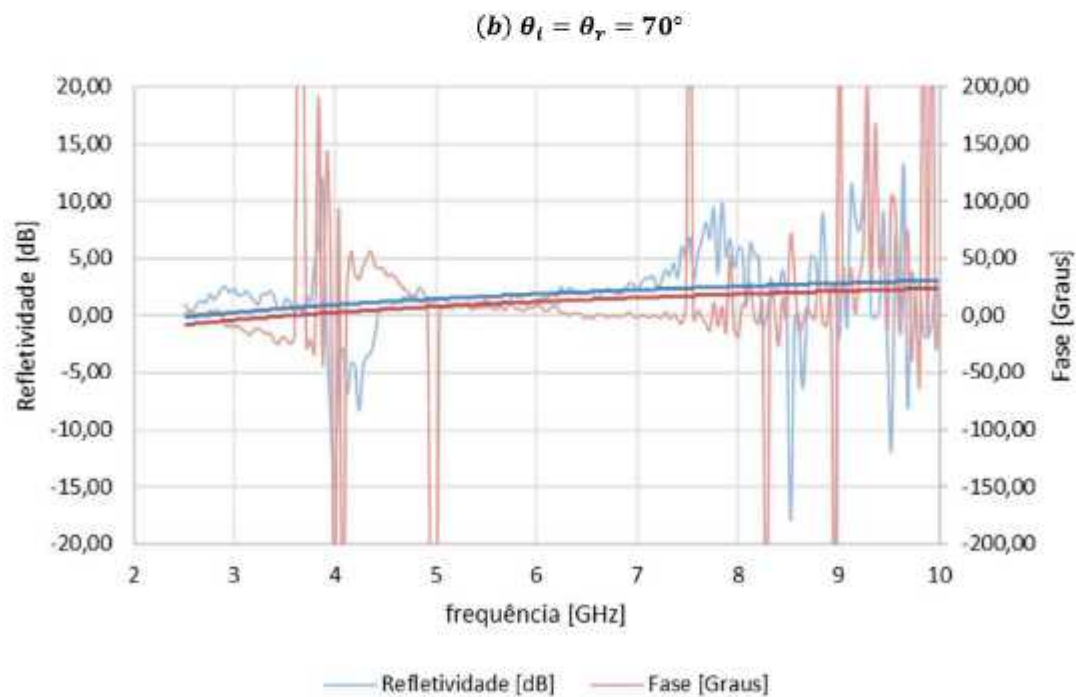
Fonte: de autoria própria

Foram usados os mesmos ângulos de incidência e reflexão, todos em relação à normal a superfície da amostra. Os valores da refletividade em módulo e fase para a polarização paralela são mostrados na Figura 12 para os diversos ângulos de incidência / reflexão considerados.

Figura 12 - Módulo e fase da refletividade para o concreto na polarização paralela – (a) $\theta_i = \theta_r = 80^\circ$; (b) $\theta_i = \theta_r = 70^\circ$; (c) $\theta_i = \theta_r = 60^\circ$; (d) $\theta_i = \theta_r = 50^\circ$; (e) $\theta_i = \theta_r = 45^\circ$; (f) $\theta_i = \theta_r = 40^\circ$; (g) $\theta_i = \theta_r = 30^\circ$; (h) $\theta_i = \theta_r = 20^\circ$; (i) $\theta_i = \theta_r = 10^\circ$

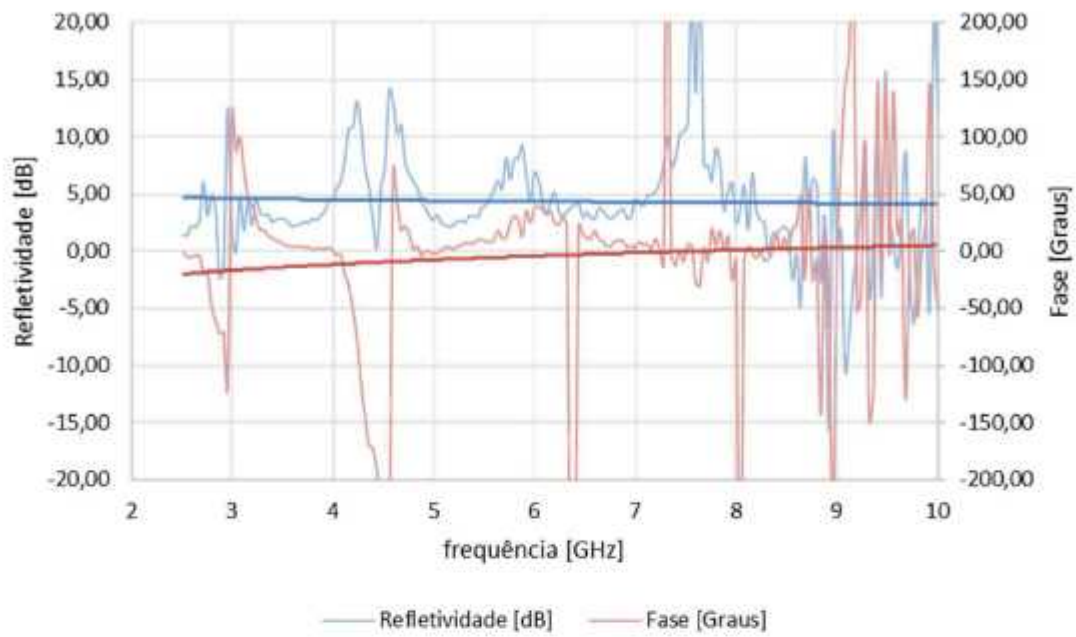


Fonte: de autoria própria



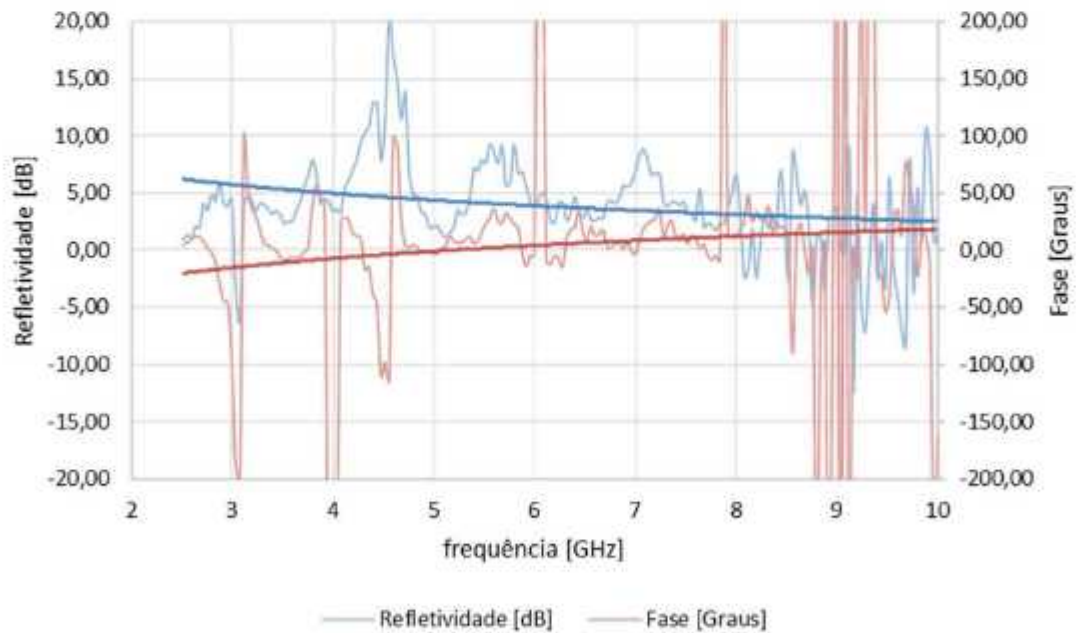
Fonte: de autoria própria

(c) $\theta_i = \theta_r = 60^\circ$



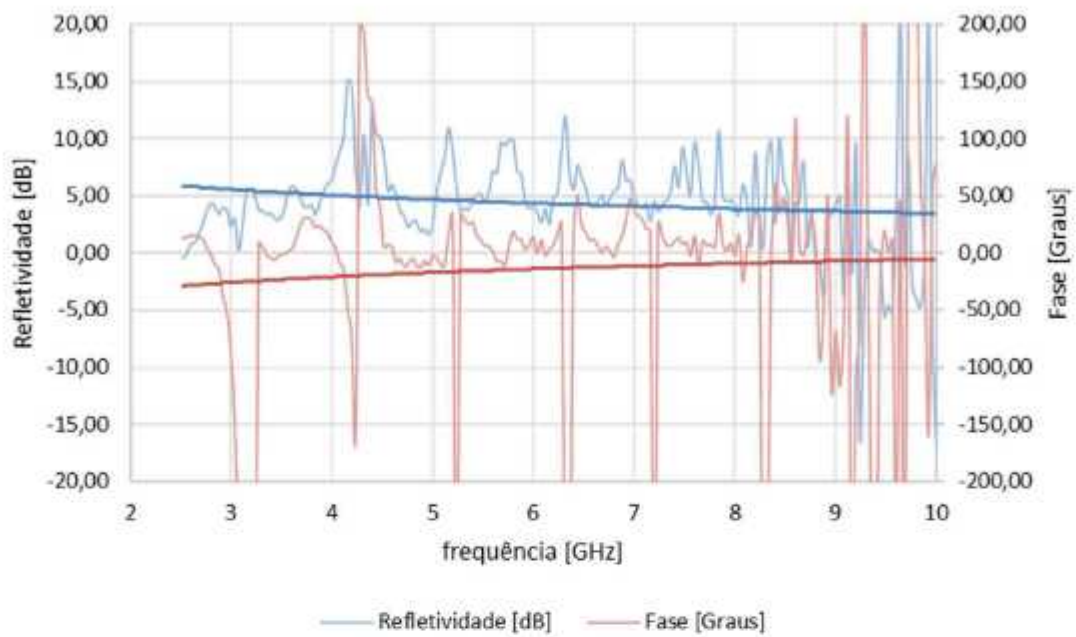
Fonte: de autoria própria

(d) $\theta_i = \theta_r = 50^\circ$



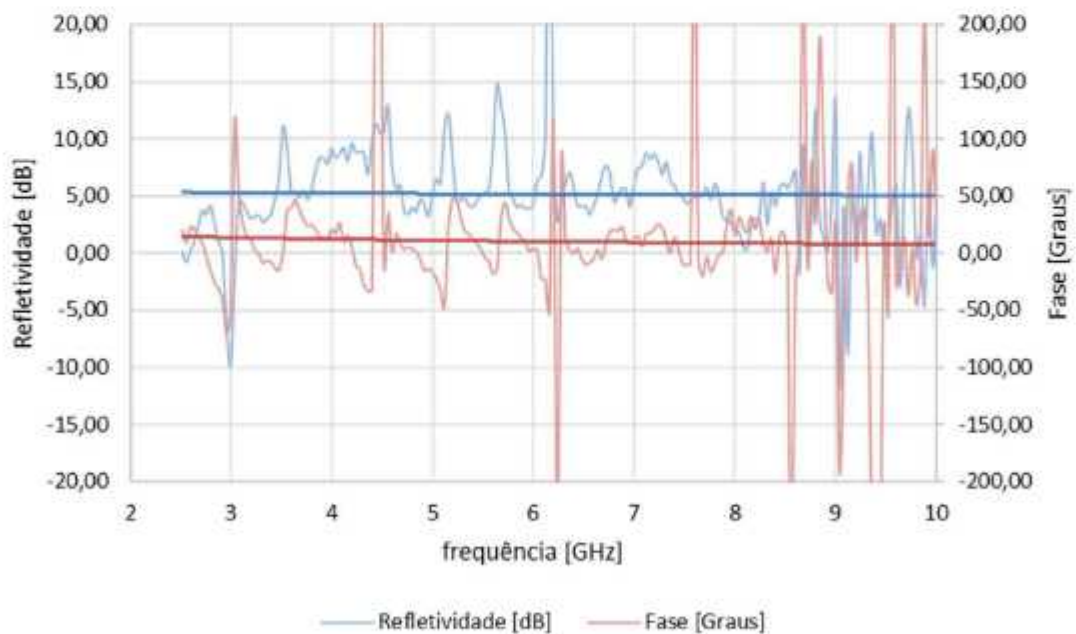
Fonte: de autoria própria

(e) $\theta_i = \theta_r = 45^\circ$



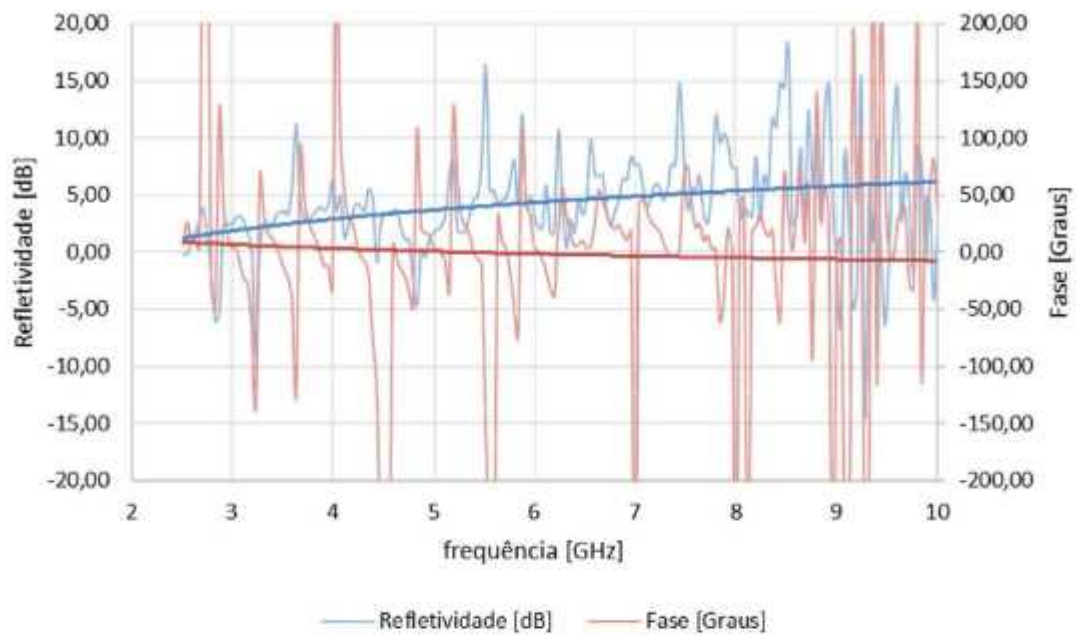
Fonte: de autoria própria

(f) $\theta_i = \theta_r = 40^\circ$



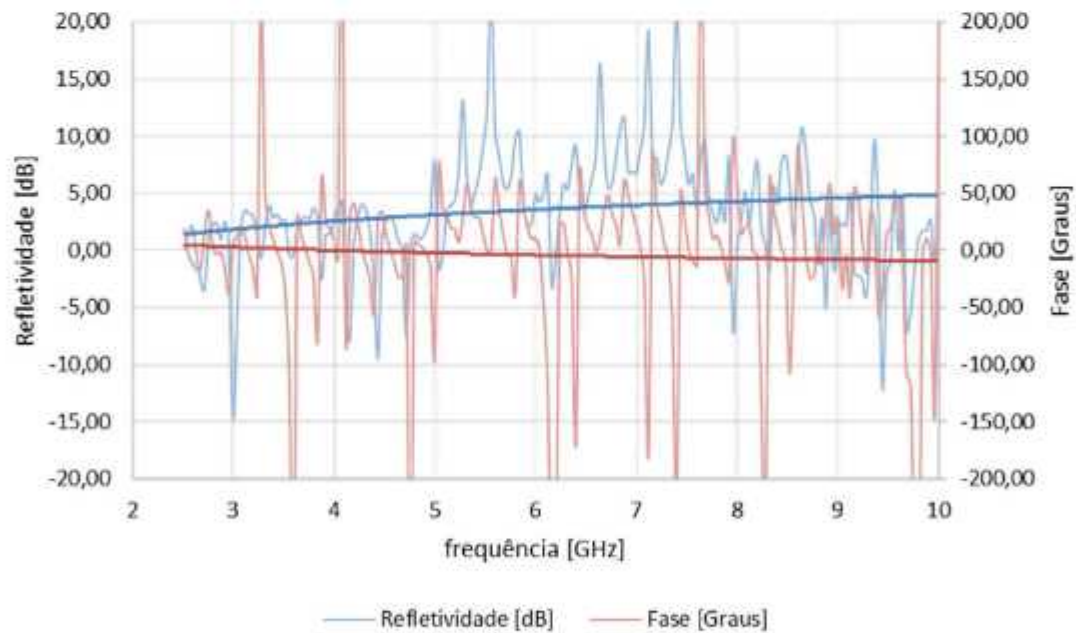
Fonte: de autoria própria

(g) $\theta_i = \theta_r = 30^\circ$

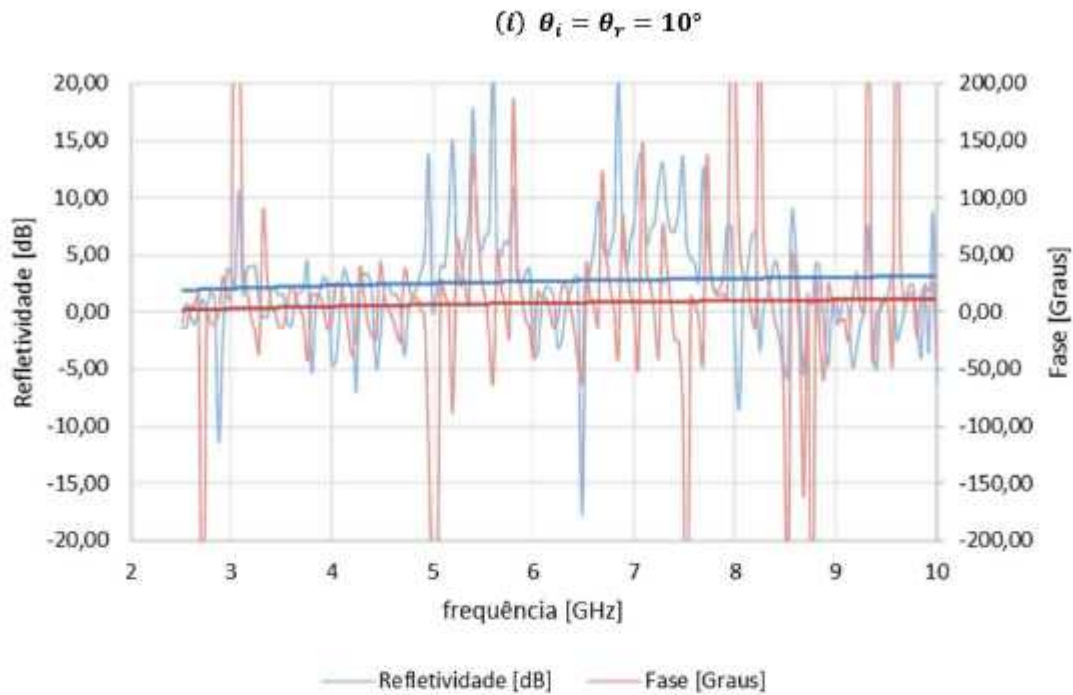


Fonte: de autoria própria

(h) $\theta_i = \theta_r = 20^\circ$



Fonte: de autoria própria



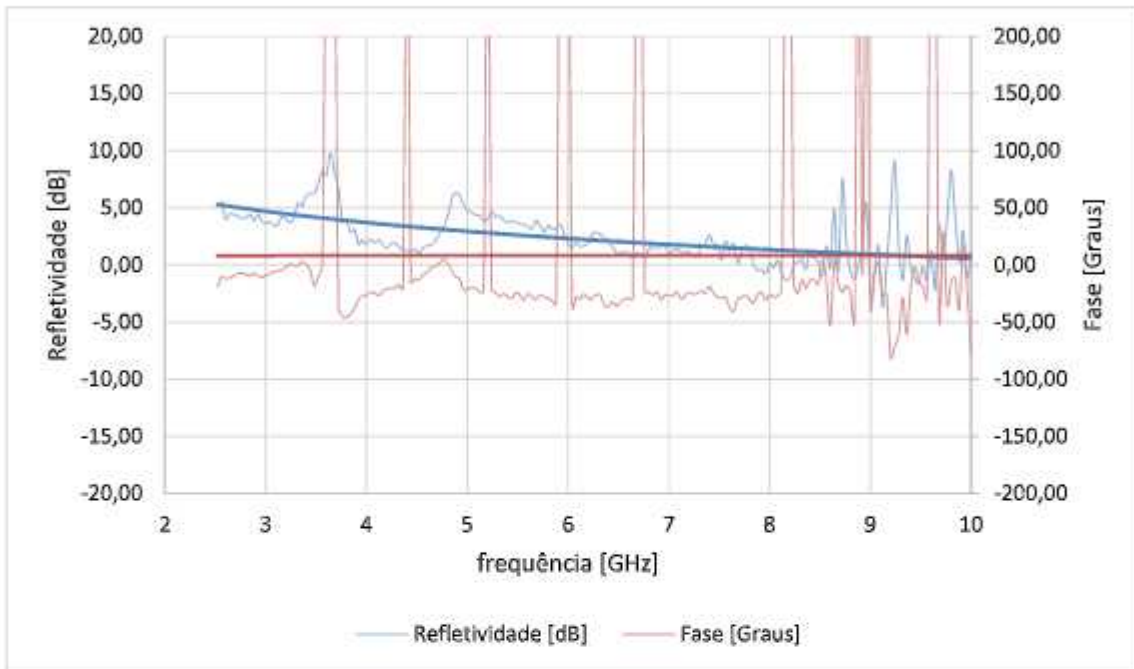
Fonte: de autoria própria

Os resultados apresentados na Figura 12 mostram que, para ângulos rasantes de incidências (considerando a superfície do material) Figura 12 (a) e 12 (b), a intensidade do sinal refletido pelo concreto é muito próximo daquele refletido pela superfície condutora, resultando numa baixa refletividade e coincidência de fase entre os sinais incidentes e refletidos. Para ângulos de incidência entre 60° e 40° Figura 12 (c), 12 (d), 12 (e) e 12 (f) em relação à normal, os valores de refletividade variaram entre 5 dB para as frequências em torno de 3 GHz e reduzindo o valor para frequências próximas a 10 GHz. Também foi verificada uma grande variação angular, embora a média dessa variação tenha se mantido entre -20° para as frequências em torno de 3 GHz e 10° para as frequências em torno de 10 GHz.

A Figura 13 mostra o resultado das medidas de refletividade para o concreto considerando agora a polarização perpendicular.

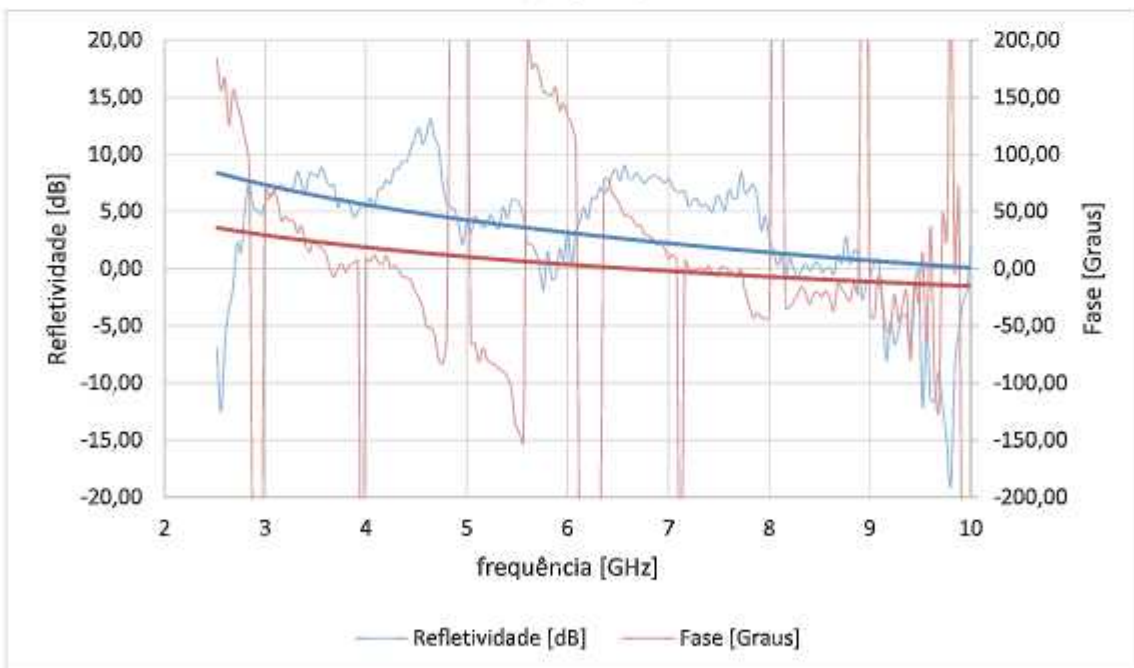
Figura 13 - Módulo e fase da refletividade para o concreto na polarização perpendicular – (a) $\theta_i = \theta_r = 80^\circ$; (b) $\theta_i = \theta_r = 70^\circ$; (c) $\theta_i = \theta_r = 60^\circ$; (d) $\theta_i = \theta_r = 50^\circ$; (e) $\theta_i = \theta_r = 45^\circ$; (f) $\theta_i = \theta_r = 40^\circ$; (g) $\theta_i = \theta_r = 30^\circ$; (h) $\theta_i = \theta_r = 20^\circ$; (i) $\theta_i = \theta_r = 10^\circ$

(a) $\theta_i = \theta_r = 80^\circ$



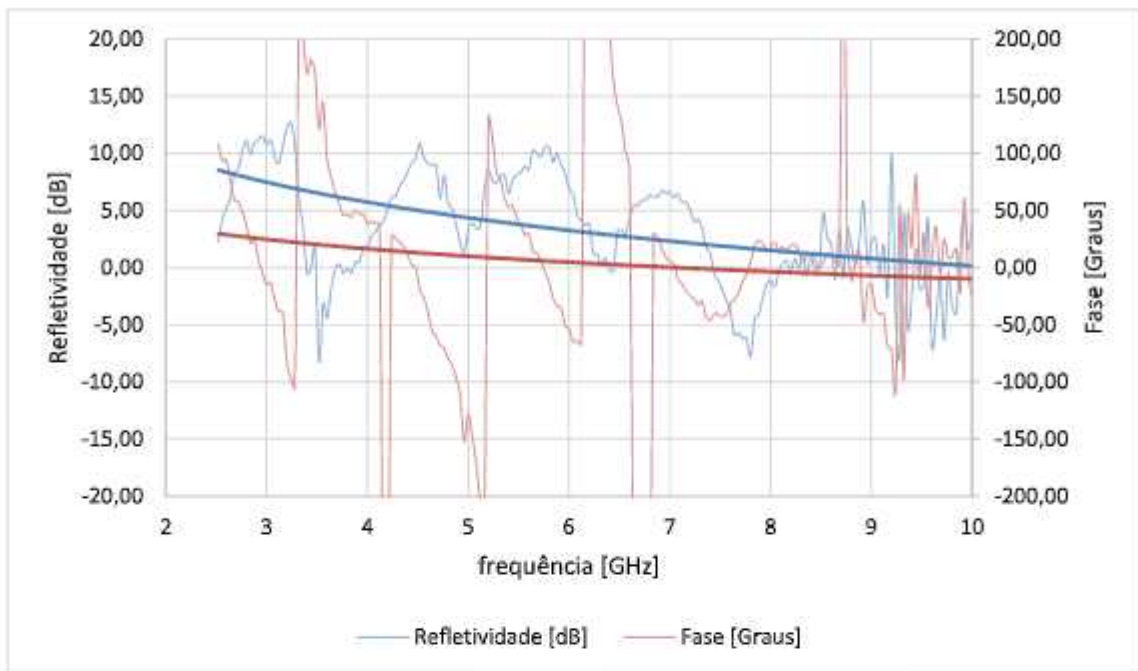
Fonte: de autoria própria

(b) $\theta_i = \theta_r = 70^\circ$



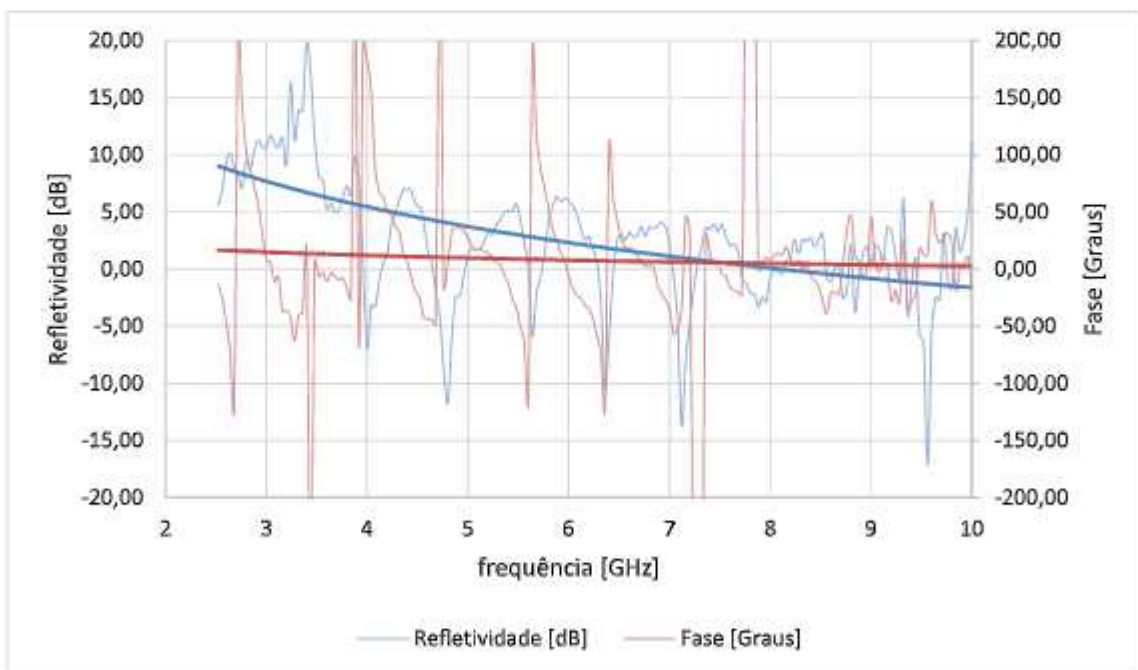
Fonte: de autoria própria

(c) $\theta_i = \theta_r = 60^\circ$



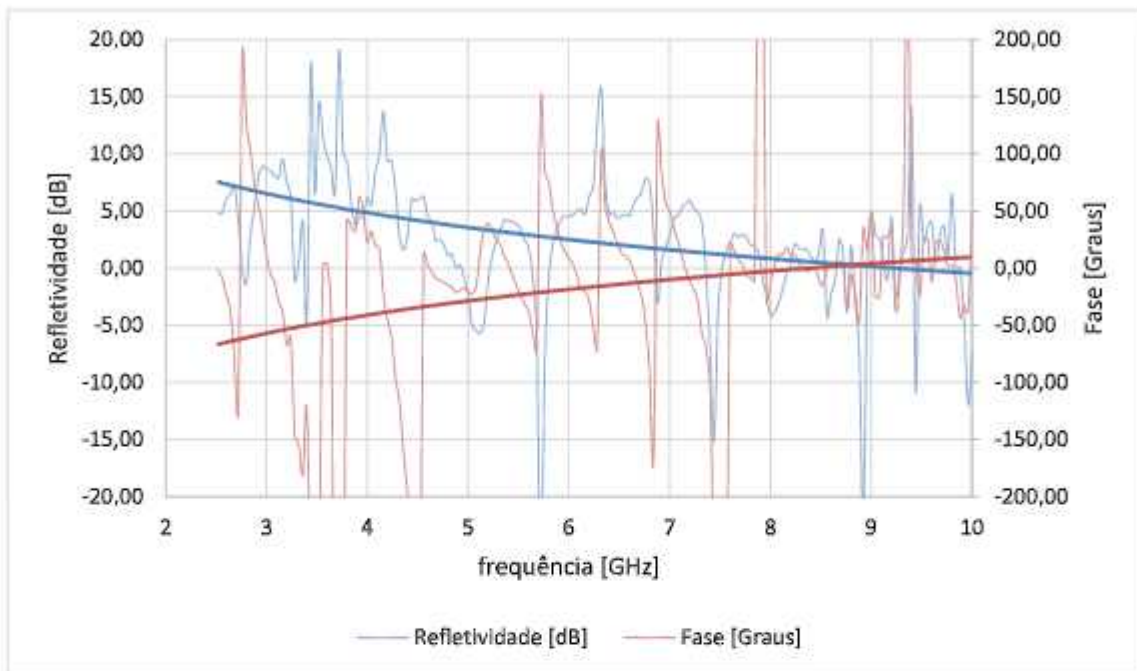
Fonte: de autoria própria

(d) $\theta_i = \theta_r = 50^\circ$



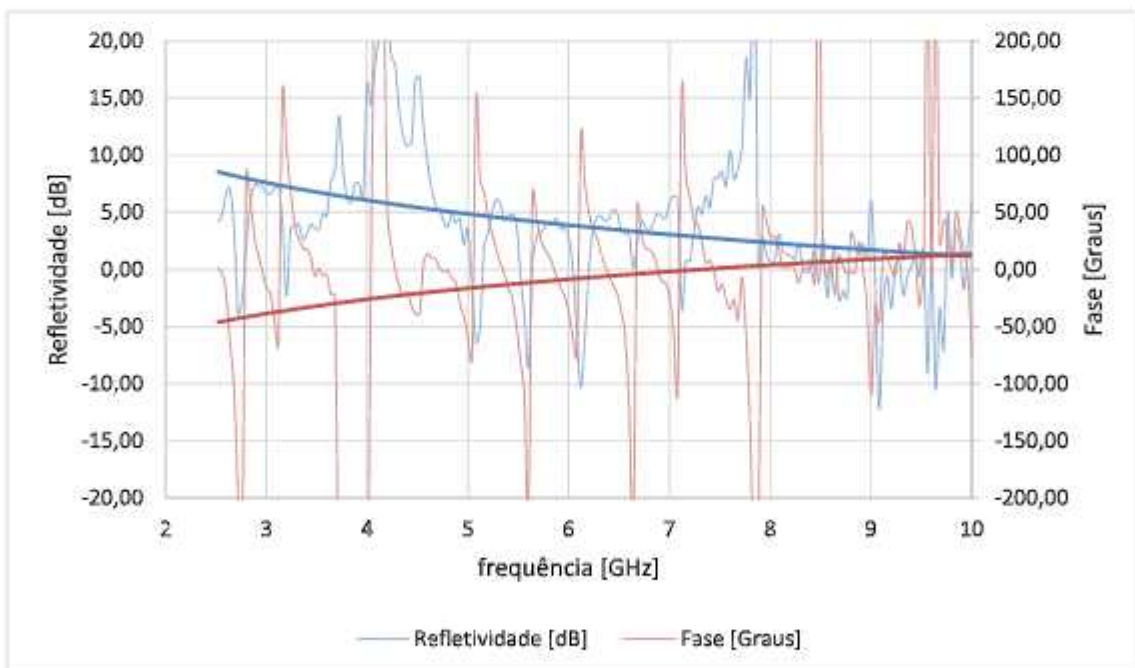
Fonte: de autoria própria

(e) $\theta_i = \theta_r = 45^\circ$



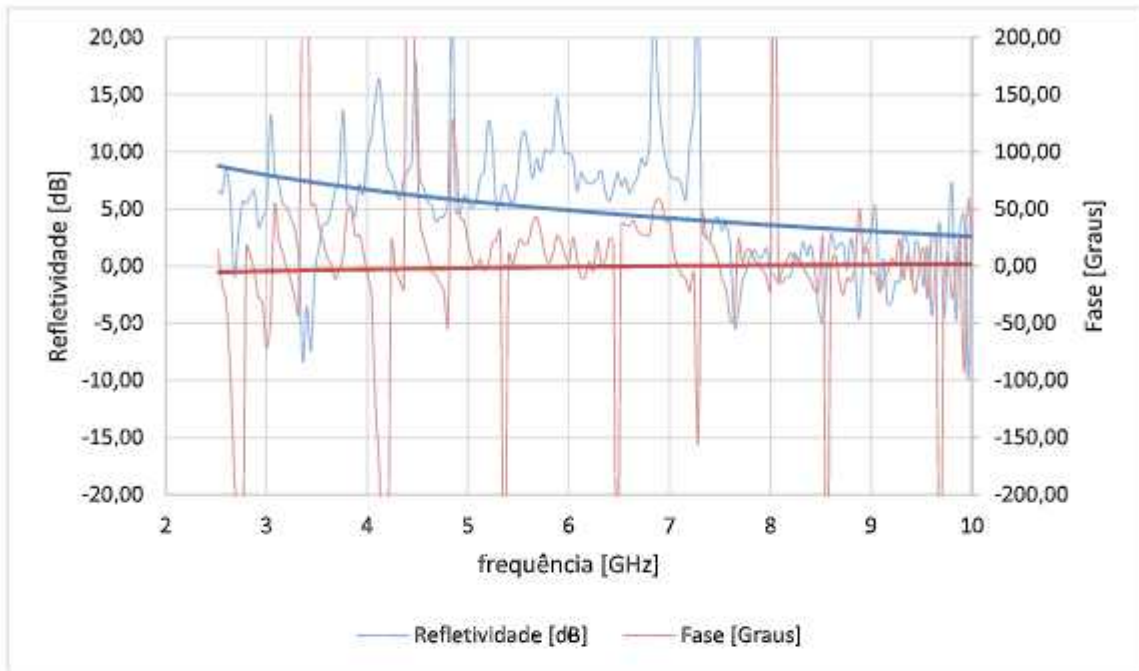
Fonte: de autoria própria

(f) $\theta_i = \theta_r = 40^\circ$



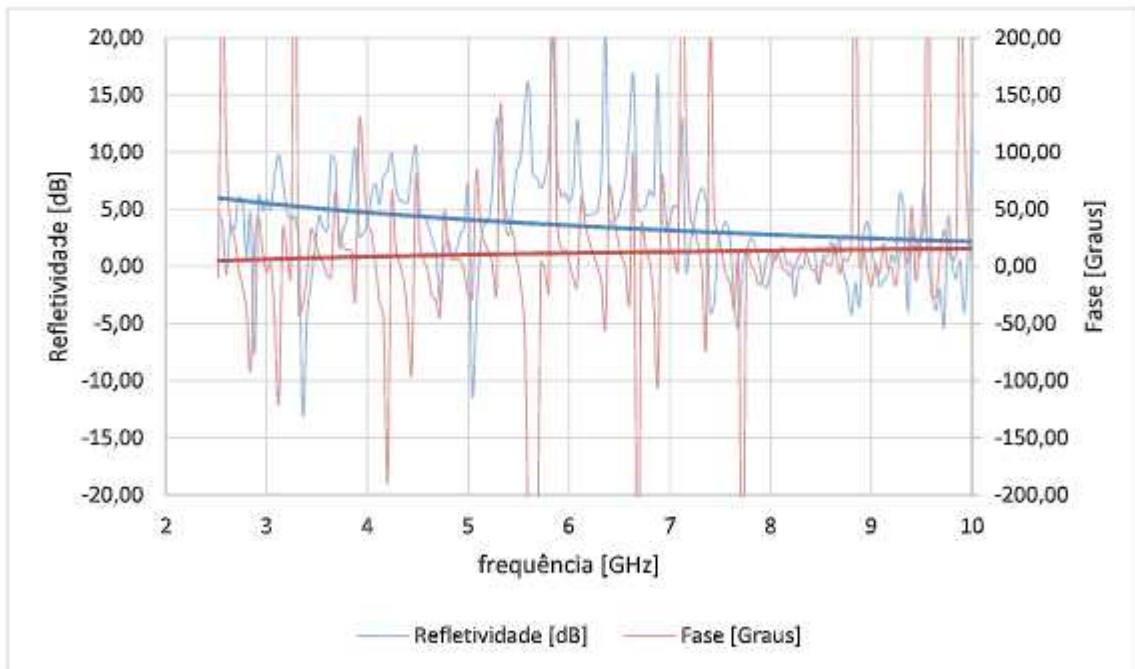
Fonte: de autoria própria

(g) $\theta_i = \theta_r = 30^\circ$



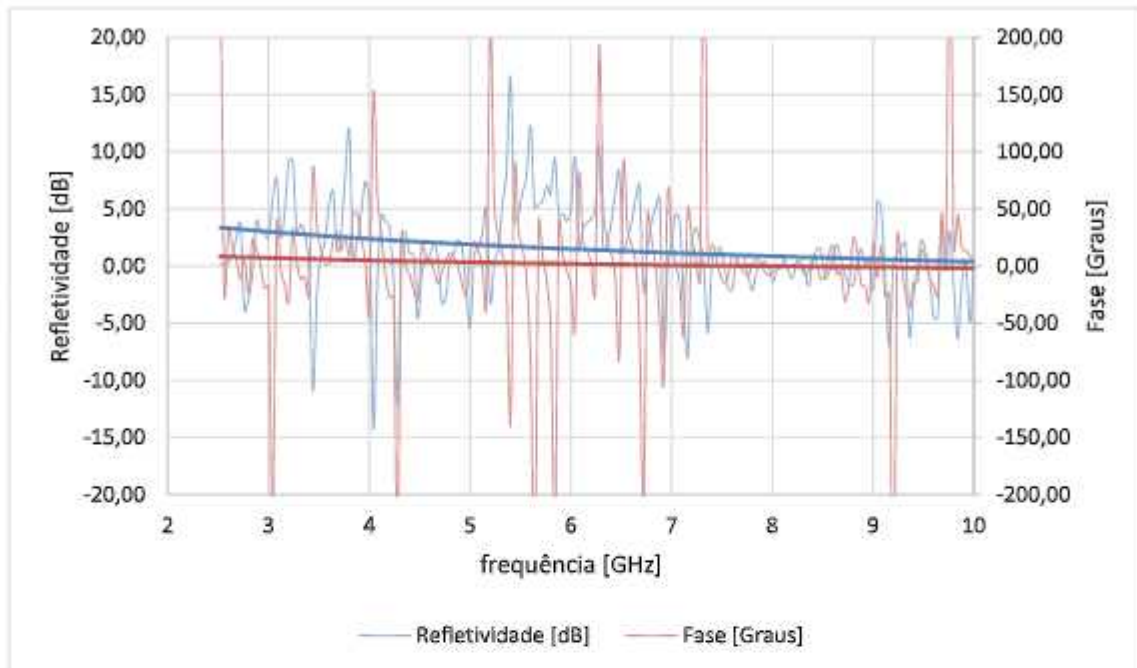
Fonte: de autoria própria

(h) $\theta_i = \theta_r = 20^\circ$



Fonte: de autoria própria

$$(l) \theta_i = \theta_r = 10^\circ$$



Fonte: de autoria própria

Os resultados mostrados na Figura 13 apontam que há uma tendência na redução dos valores da refletividade à proporção que a frequência aumenta. O comprimento de onda do sinal lançado na amostra de concreto diminui à medida que a frequência aumenta, gerando um efeito micro no MUT, diminuindo a refletividade. Para ângulos de incidência de 80° e 70° em relação a normal, Figura 13 (a) e 13 (b) os valores de refletividade variaram entre 5 dB e 7,5 dB para frequências em torno de 3 GHz, reduzindo o valor a 0 dB para frequências próximas a 10 GHz. Quando o ângulo de incidência do sinal é de 50° a refletividade altera-se de 7,5 dB na frequência de 3 GHz para -2,5 dB na frequência de 10 GHz. Também foi verificada uma variação angular para as frequências em torno de 3 GHz os valores ficaram em torno de -60° oscilando a 10° para as frequências em torno de 10 GHz, quando a antena foi posicionada com 45° em relação à normal, Figura 13 (e).

4.2 RESULTADOS PARA O GESSO

Para as medições realizadas na amostra do gesso foi analisada uma placa de dimensões $60\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ e 3 cm de espessura, posicionada no centro do arco NRL.

Como referência foi considerado uma placa de alumínio de mesma dimensão, disposta sobre a amostra de gesso, Figura 14.

Figura 14 - Amostra de gesso com placa de alumínio sobre a amostra, posicionada no centro do Arco NRL.

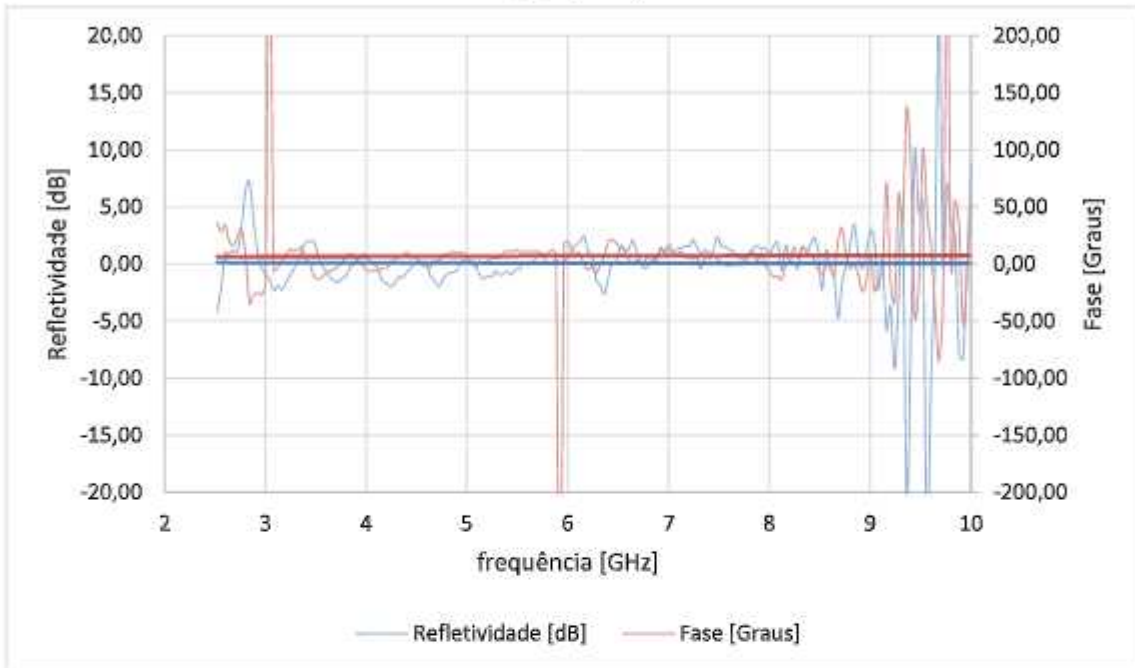


Fonte: de autoria própria

Os ângulos de incidência e reflexão aplicados foram os mesmos, todos em relação a normal a superfície da amostra. Os valores da refletividade em módulo e fase para a polarização paralela são mostrados na Figura 15 para os diversos ângulos de incidência / reflexão considerados.

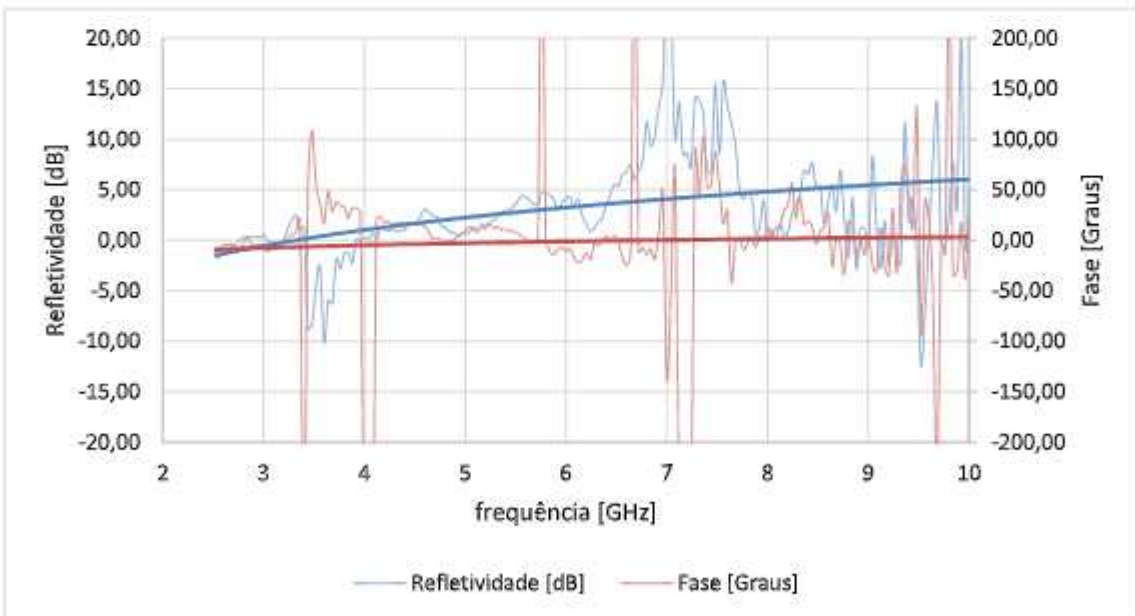
Figura 15 - Módulo e fase da refletividade para o gesso na polarização paralela – (a) $\theta_i = \theta_r = 80^\circ$; (b) $\theta_i = \theta_r = 70^\circ$; (c) $\theta_i = \theta_r = 60^\circ$; (d) $\theta_i = \theta_r = 50^\circ$; (e) $\theta_i = \theta_r = 45^\circ$; (f) $\theta_i = \theta_r = 40^\circ$; (g) $\theta_i = \theta_r = 30^\circ$; (h) $\theta_i = \theta_r = 20^\circ$; (i) $\theta_i = \theta_r = 10^\circ$

(a) $\theta_i = \theta_r = 80^\circ$



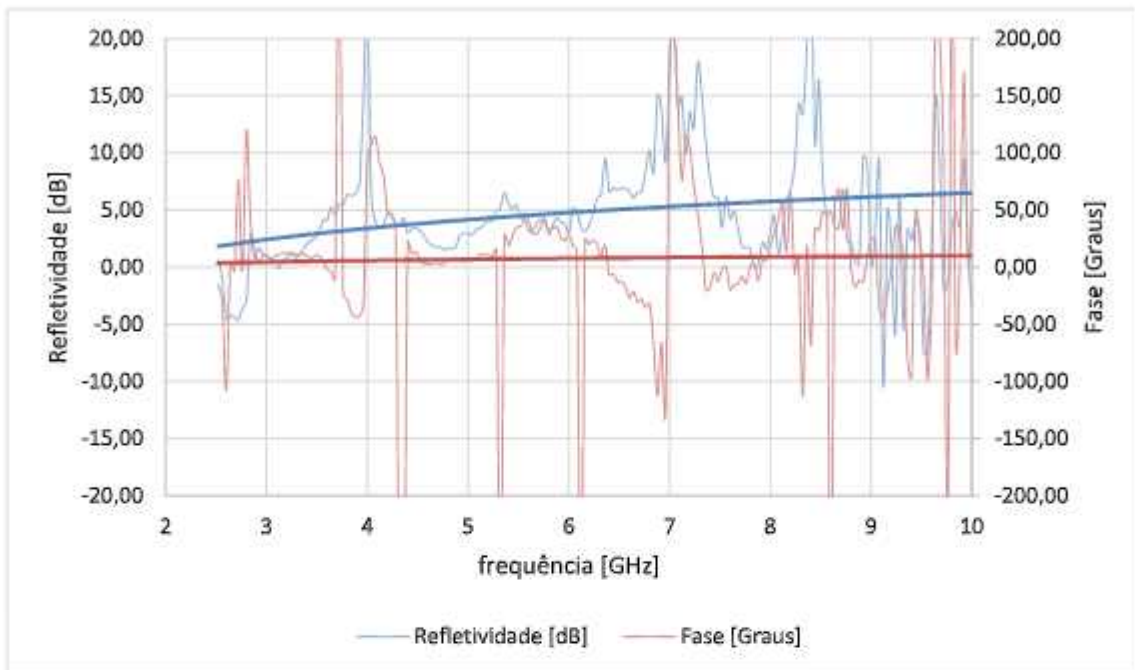
Fonte: de autoria própria

(b) $\theta_i = \theta_r = 70^\circ$



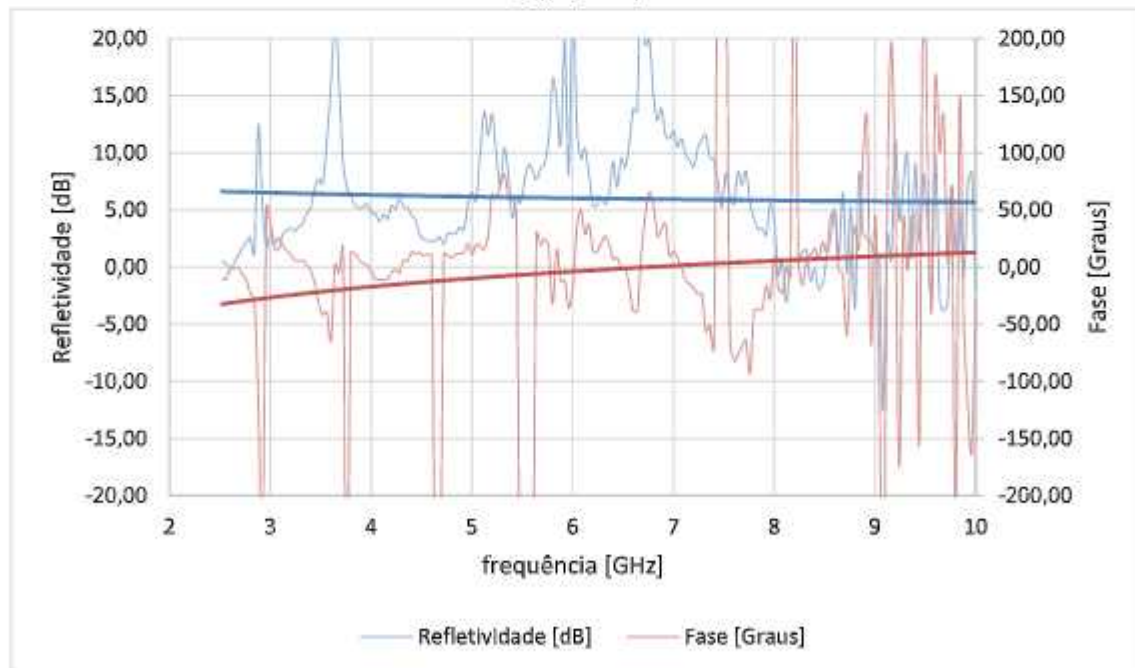
Fonte: de autoria própria

(c) $\theta_i = \theta_r = 60^\circ$



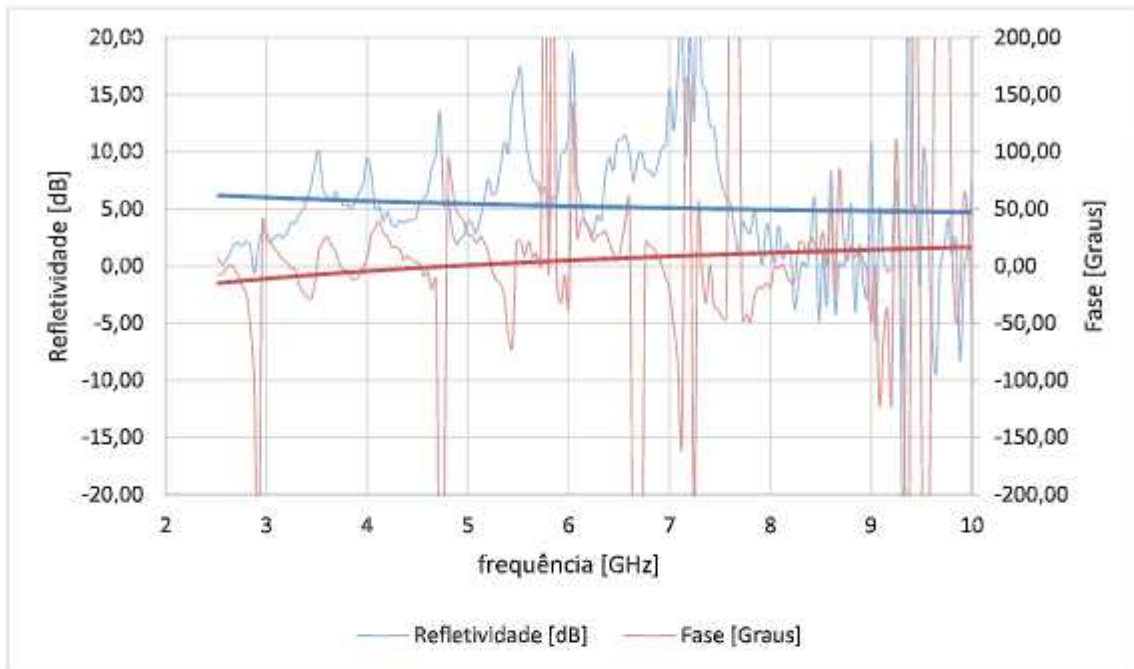
Fonte: de autoria própria

(d) $\theta_i = \theta_r = 50^\circ$



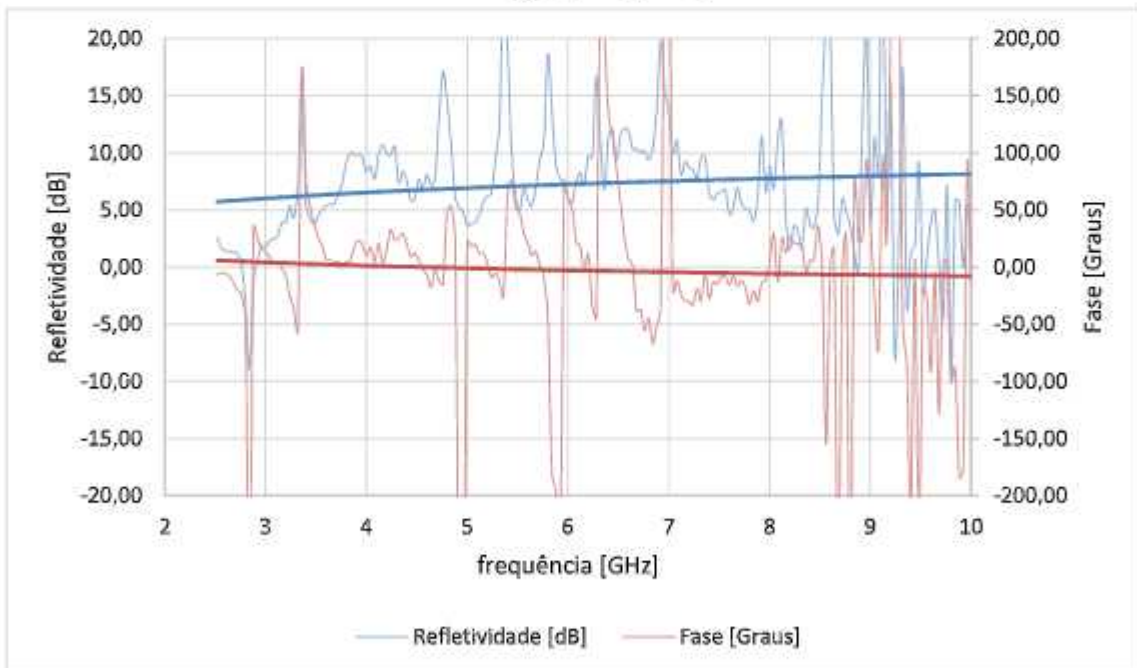
Fonte: de autoria própria

(e) $\theta_i = \theta_r = 45^\circ$



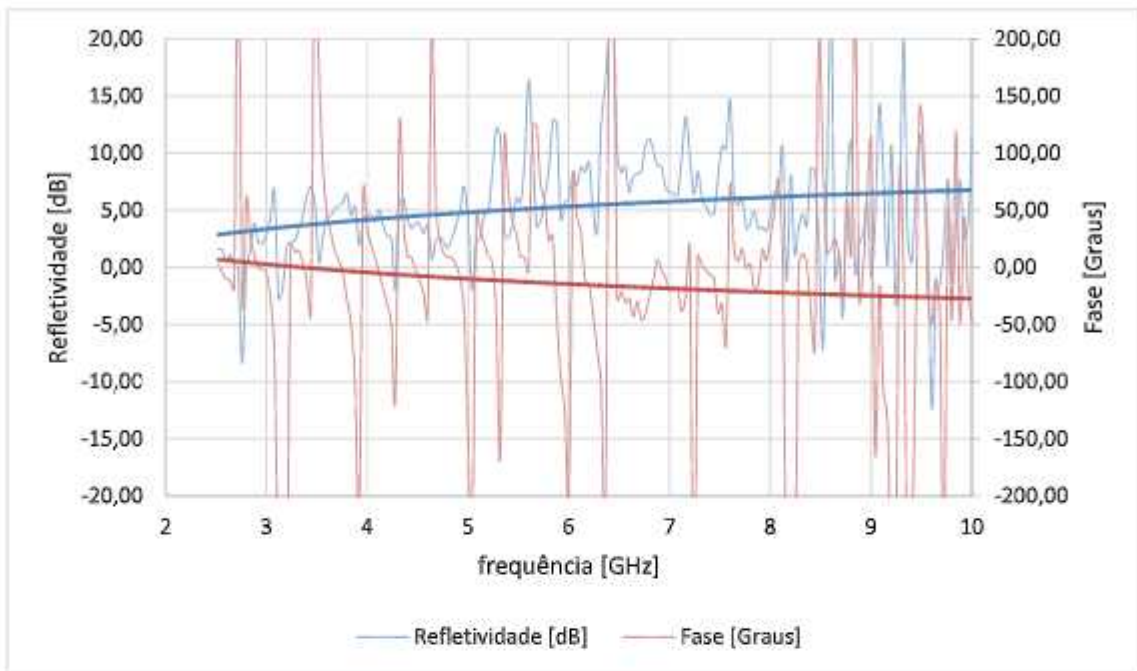
Fonte: de autoria própria

(f) $\theta_i = \theta_r = 40^\circ$



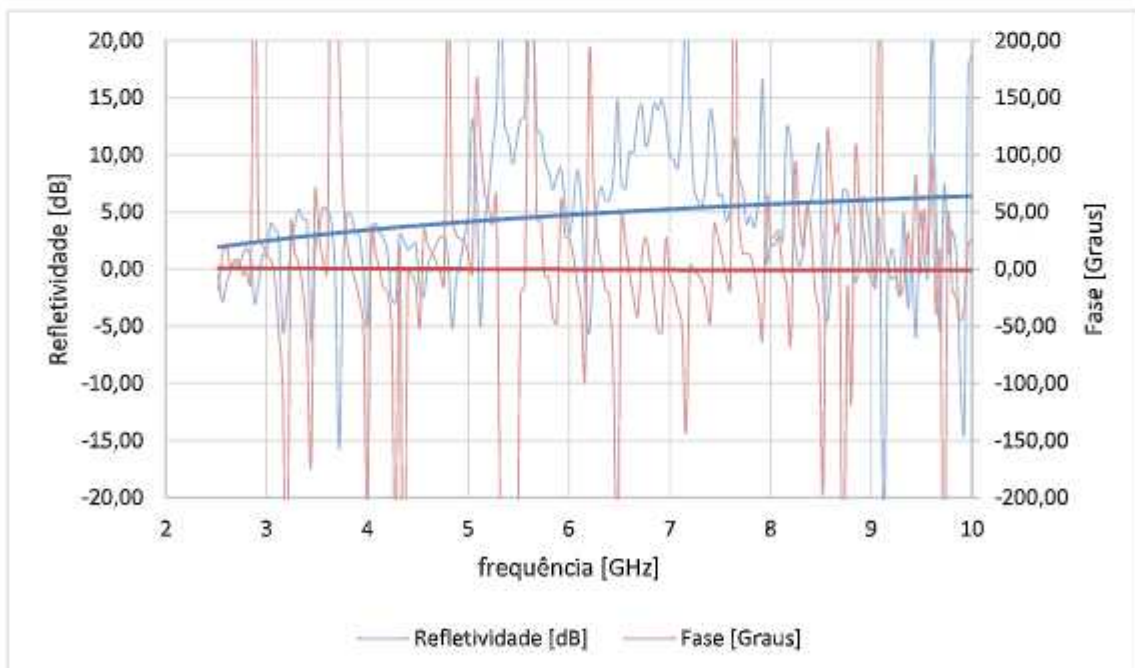
Fonte: de autoria própria

$$(g) \theta_i = \theta_r = 30^\circ$$



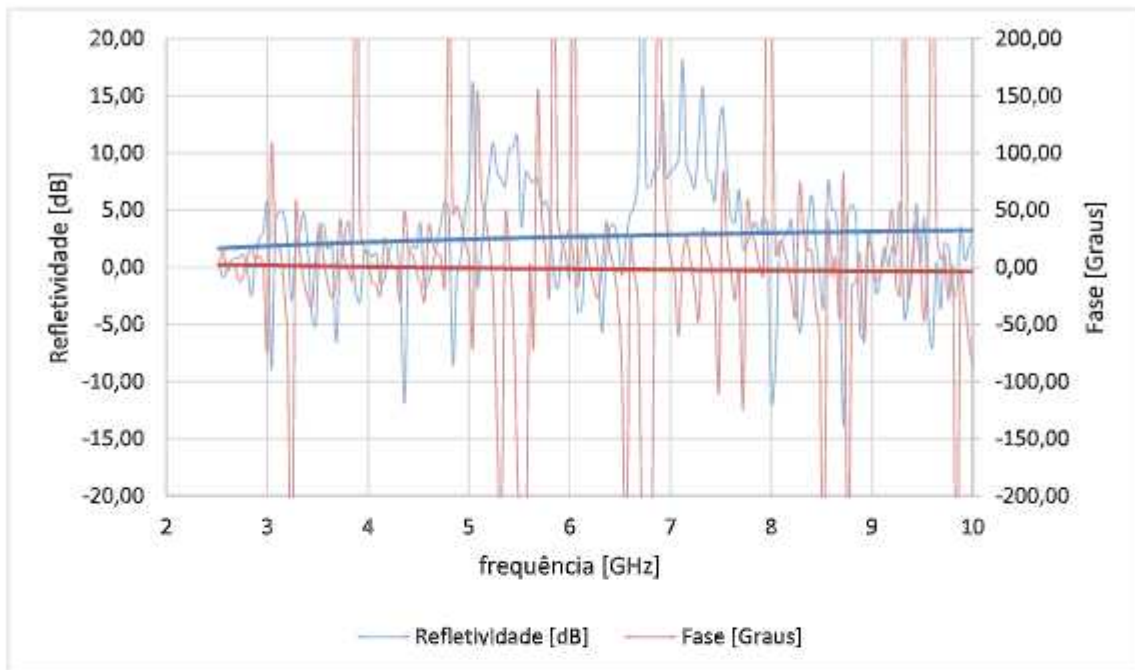
Fonte: de autoria própria

$$(h) \theta_i = \theta_r = 20^\circ$$



Fonte: de autoria própria

$$(i) \theta_i = \theta_r = 10^\circ$$



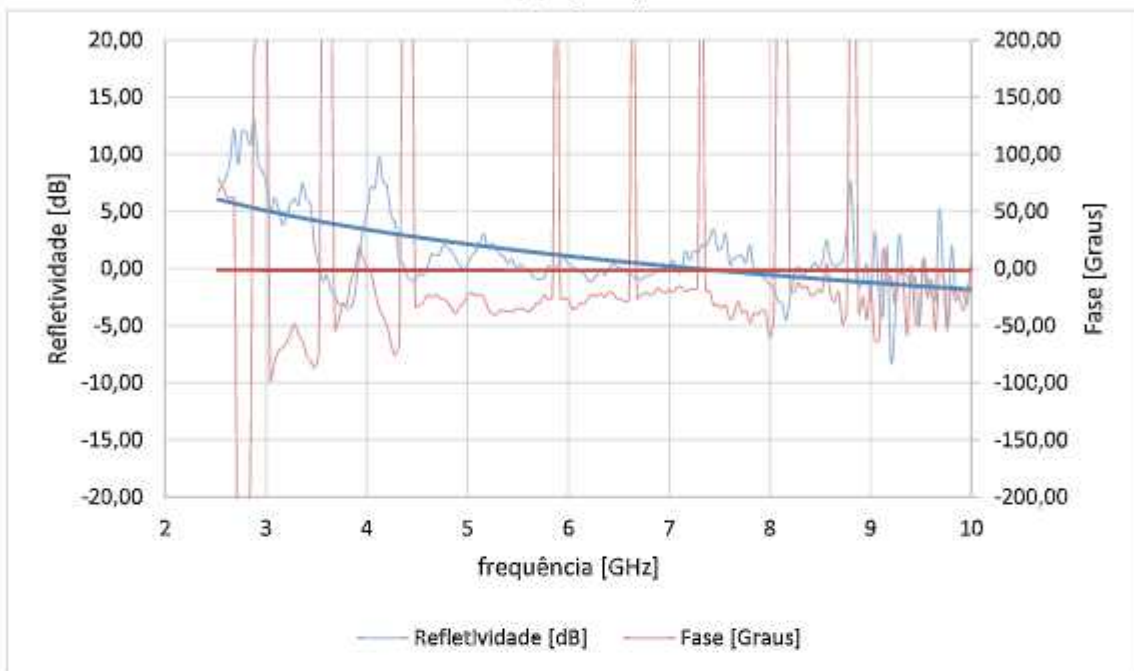
Fonte: de autoria própria

A Figura 15 apresenta os resultados para as medidas de refletividade do gesso quando o vetor campo elétrico está paralelo ao plano da amostra, para o ângulo mais rasante de incidência. Figura 15 (a) (considerando a superfície do material), a intensidade do sinal refletido pelo gesso é praticamente igual daquele refletido pela superfície condutora, deixando a refletividade em torno de 0 dB para as frequências de 2,5 GHz a 10 GHz apresentando uma coincidência de fase entre os sinais incidentes e refletidos. Para ângulos de incidência de 70° e 60° em relação a normal Figura 15 (b) e 15 (c) há um aumento nos valores da refletividade, o que nos leva a admitir que parte da energia penetrou o material e parte foi refletida, os valores variaram de 60 dB para frequências em torno de 10 GHz. Também foi notado uma pequena variação angular para as frequências entre 3 GHz e 10 GHz. Nos ângulos de incidência de 30° , 20° e 10° em relação a normal Figura 15 (g) 15 (h) e 15 (i), a refletividade segue de forma crescente admitindo valores de 2,5 dB para frequências próximas a 3 GHz e 6 dB para frequências com aproximadamente 10 GHz.

A Figura 16 mostra o resultado das medidas de refletividade para o gesso considerando agora a polarização perpendicular.

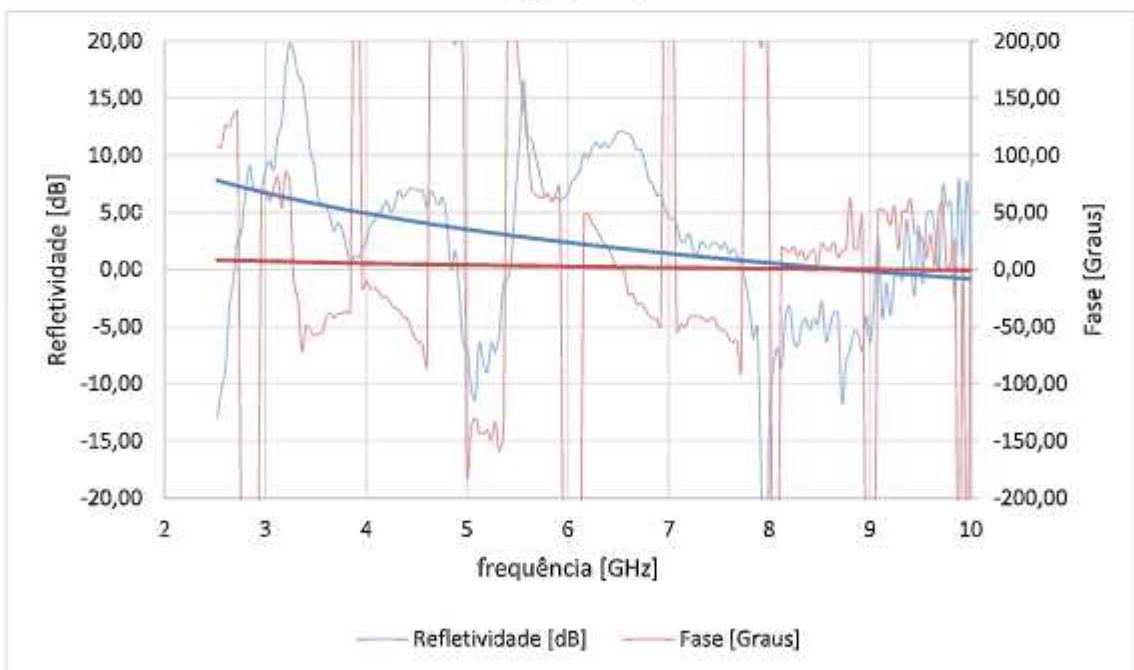
Figura 16 - Módulo e fase da refletividade para o gesso na polarização perpendicular – (a) $\theta_i = \theta_r = 80^\circ$; (b) $\theta_i = \theta_r = 70^\circ$; (c) $\theta_i = \theta_r = 60^\circ$; (d) $\theta_i = \theta_r = 50^\circ$; (e) $\theta_i = \theta_r = 45^\circ$; (f) $\theta_i = \theta_r = 40^\circ$; (g) $\theta_i = \theta_r = 30^\circ$; (h) $\theta_i = \theta_r = 20^\circ$; (i) $\theta_i = \theta_r = 10^\circ$

(a) $\theta_i = \theta_r = 80^\circ$



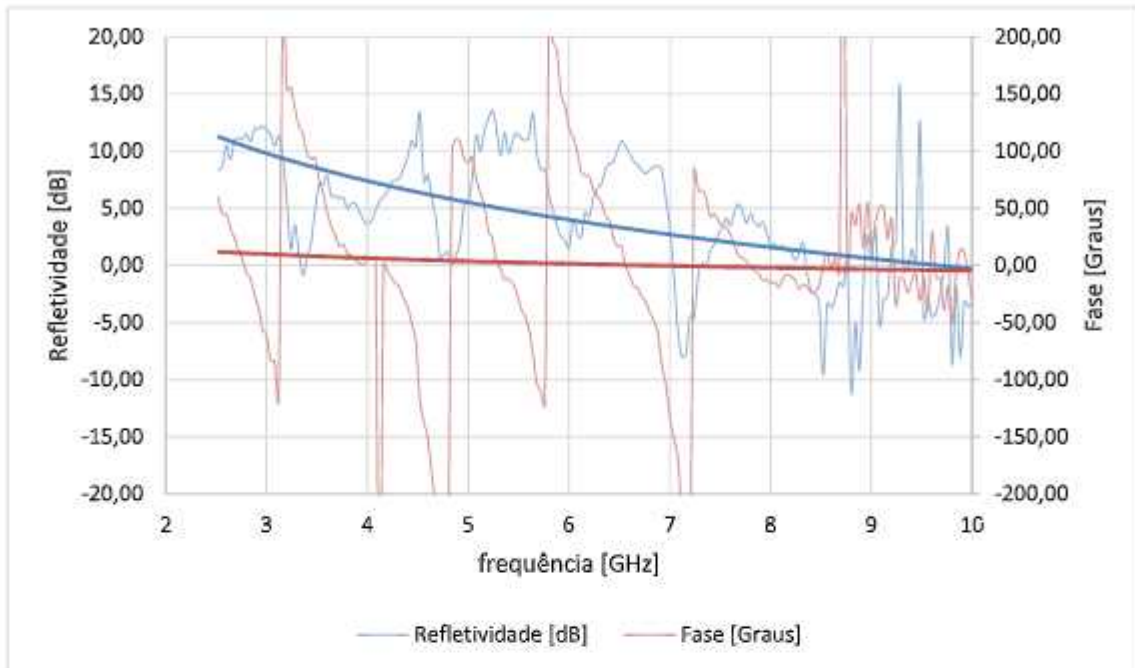
Fonte: de autoria própria

(b) $\theta_i = \theta_r = 70^\circ$



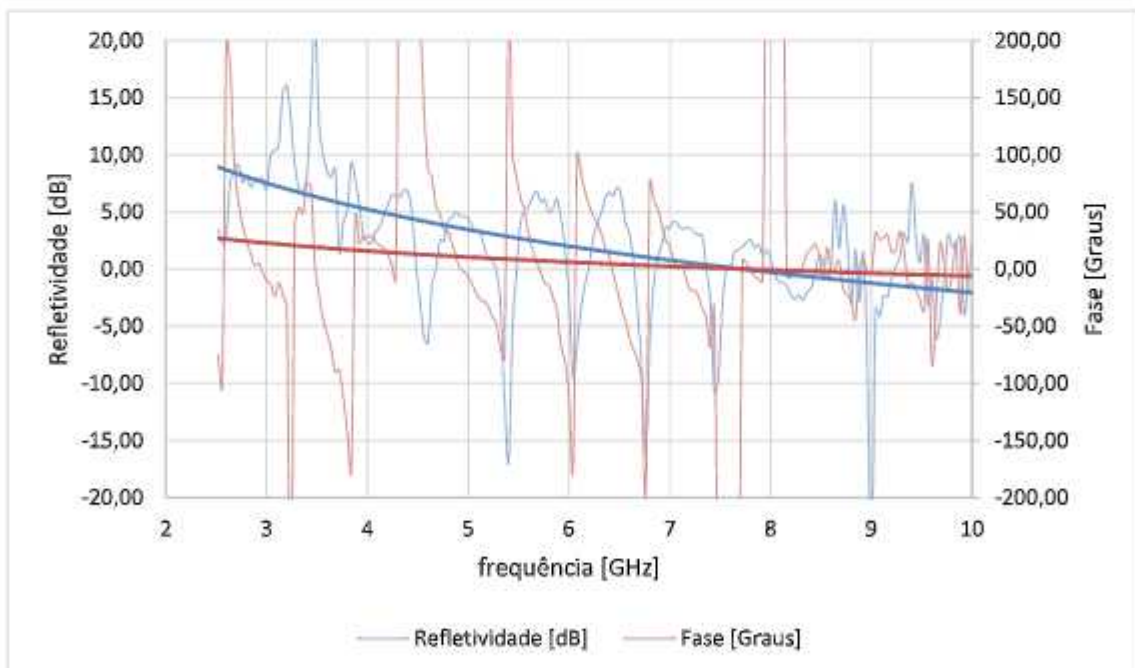
Fonte: de autoria própria

(c) $\theta_i = \theta_r = 60^\circ$



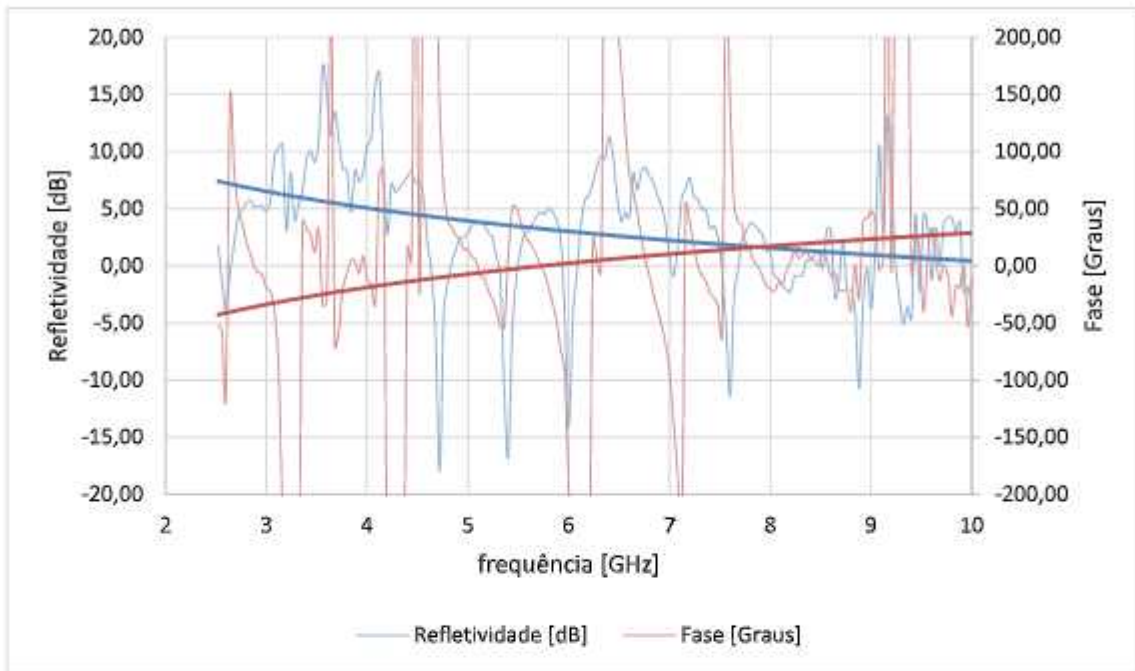
Fonte: de autoria própria

(d) $\theta_i = \theta_r = 50^\circ$



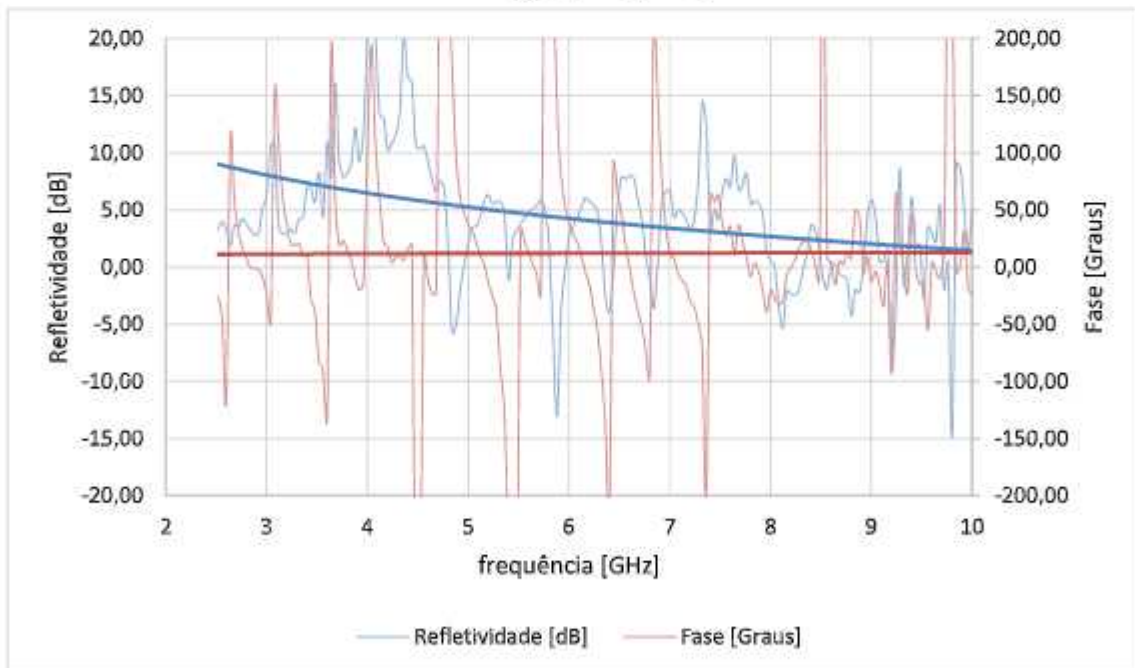
Fonte: de autoria própria

(e) $\theta_i = \theta_r = 45^\circ$



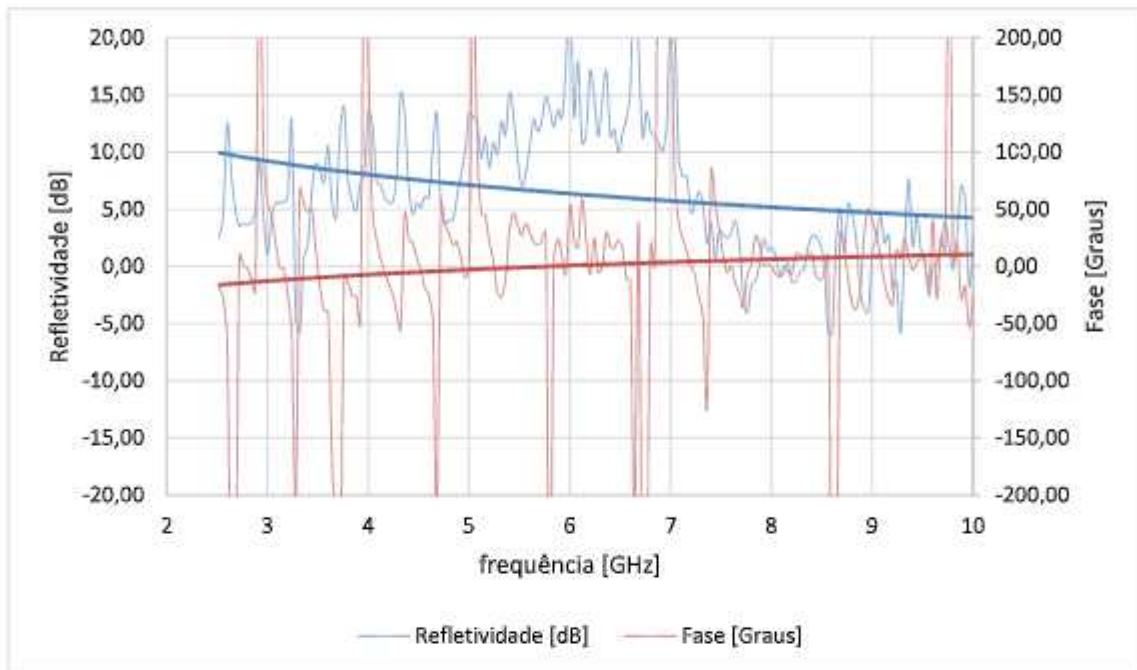
Fonte: de autoria própria

(f) $\theta_i = \theta_r = 40^\circ$



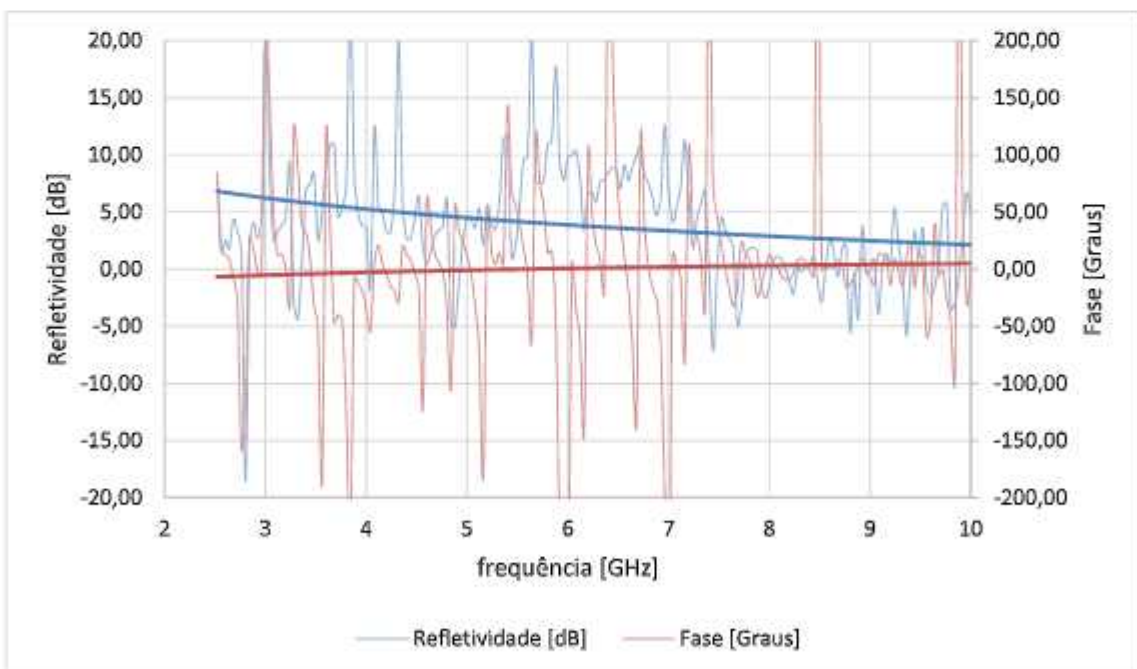
Fonte: de autoria própria

$$(g) \theta_i = \theta_r = 30^\circ$$



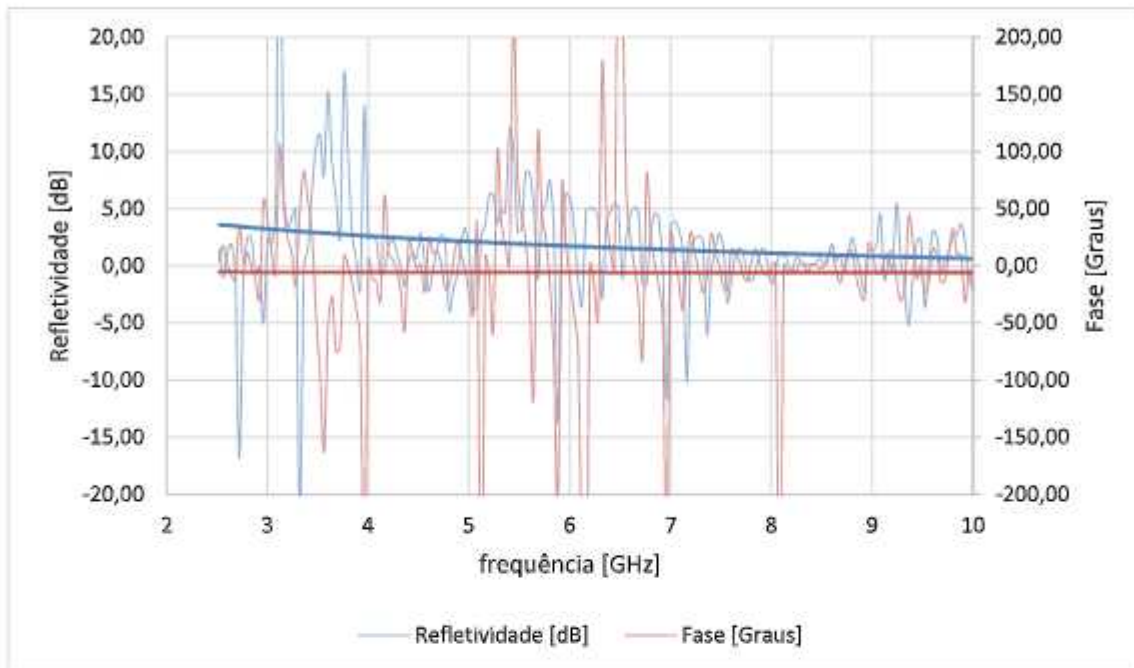
Fonte: de autoria própria

$$(h) \theta_i = \theta_r = 20^\circ$$



Fonte: de autoria própria

$$(l) \theta_i = \theta_r = 10^\circ$$



Fonte: de autoria própria

Os resultados exibidos na Figura 16 apresentam as medidas de refletividade para o gesso quando o vetor campo elétrico está perpendicular ao plano da amostra, eles apontam que há redução nos valores da refletividade à medida que a frequência aumenta. Com isso observamos que em frequências próximas a 10 GHz a reflexão do material é alta, para elas a refletividade fica próximo de 0 dB nos ângulos de incidência de 70° , 60° , 45° e 40° em relação a normal, Figura 16 (b), 16 (c), 16 (e) e 16 (f). Quando o ângulo de incidência do sinal é de 80° a refletividade altera-se de 5 dB na frequência de 3 GHz para -10 dB na frequência de 10 GHz, Figura 16 (a). Houve considerada variação angular quando a antena foi posicionada com 45° em relação à normal, Figura 16 (e), para as frequências em torno de 3 GHz os valores ficaram em torno de -40° oscilando a 30° para as frequências em torno de 10 GHz.

4.3 RESULTADOS PARA O PORCELANATO

As medidas para o porcelanato foram realizadas avaliando uma amostra do tipo esmaltado com dimensão $60\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ e 8 mm de espessura. Assim como os outros materiais, ele também foi colocado no centro do arco NRL, Figura 17. Como referência

foi considerado uma placa de alumínio com dimensão $60\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ e 1 mm de espessura colocada sobre a amostra do MUT.

Figura 17 - Porcelanato $60\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ posicionado no Arco NRL para as medições

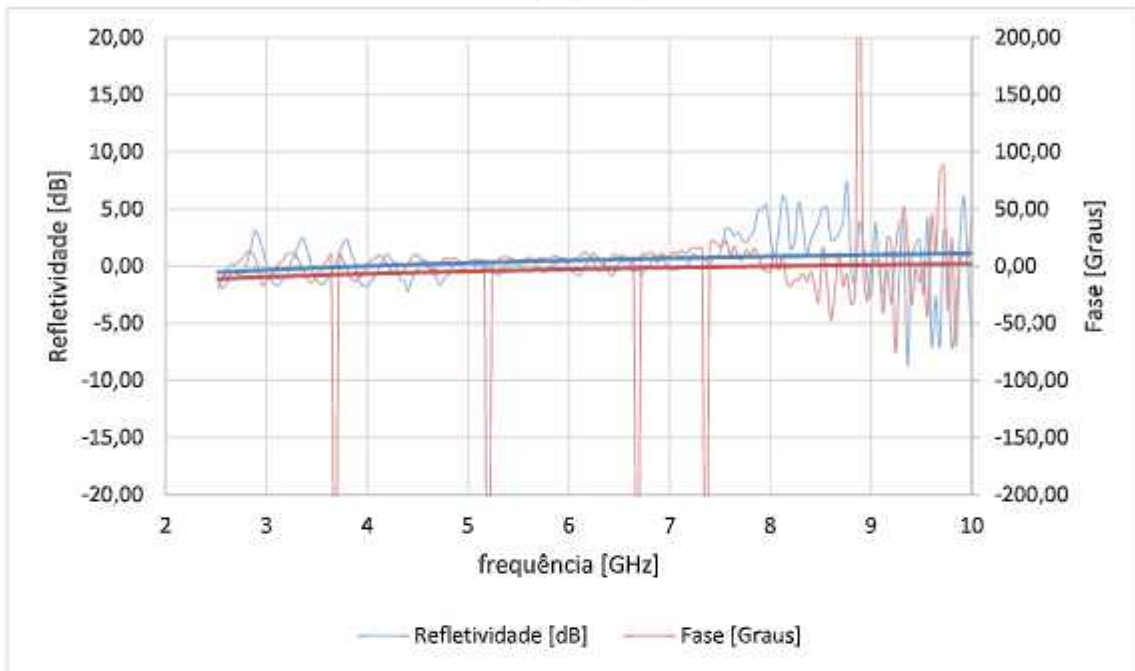


Fonte: de autoria própria

Foram usados os mesmos ângulos de incidência e reflexão, todos em relação à normal a superfície da amostra. Os valores da refletividade em módulo e fase para a polarização paralela das antenas são mostrados na Figura 18 para os diversos ângulos de incidência / reflexão considerados.

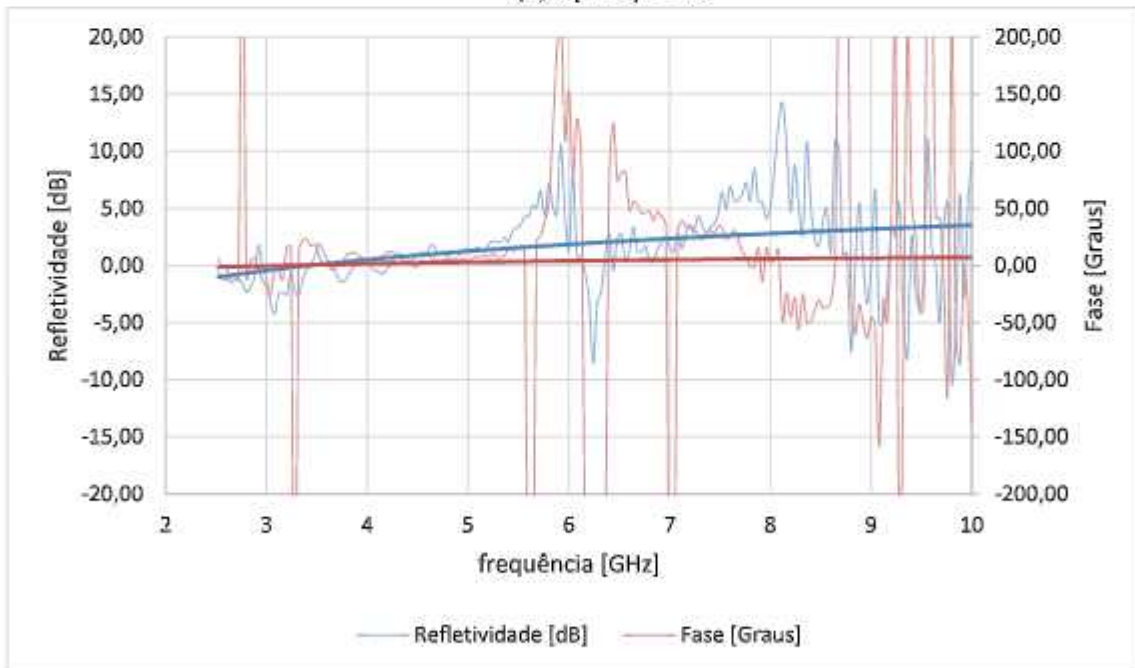
Figura 18 - Módulo e fase da refletividade para o porcelanato na polarização paralela – (a) $\theta_i = \theta_r = 80^\circ$; (b) $\theta_i = \theta_r = 70^\circ$; (c) $\theta_i = \theta_r = 60^\circ$; (d) $\theta_i = \theta_r = 50^\circ$; (e) $\theta_i = \theta_r = 45^\circ$; (f) $\theta_i = \theta_r = 40^\circ$; (g) $\theta_i = \theta_r = 30^\circ$; (h) $\theta_i = \theta_r = 20^\circ$; (i) $\theta_i = \theta_r = 10^\circ$

(a) $\theta_i = \theta_r = 80^\circ$



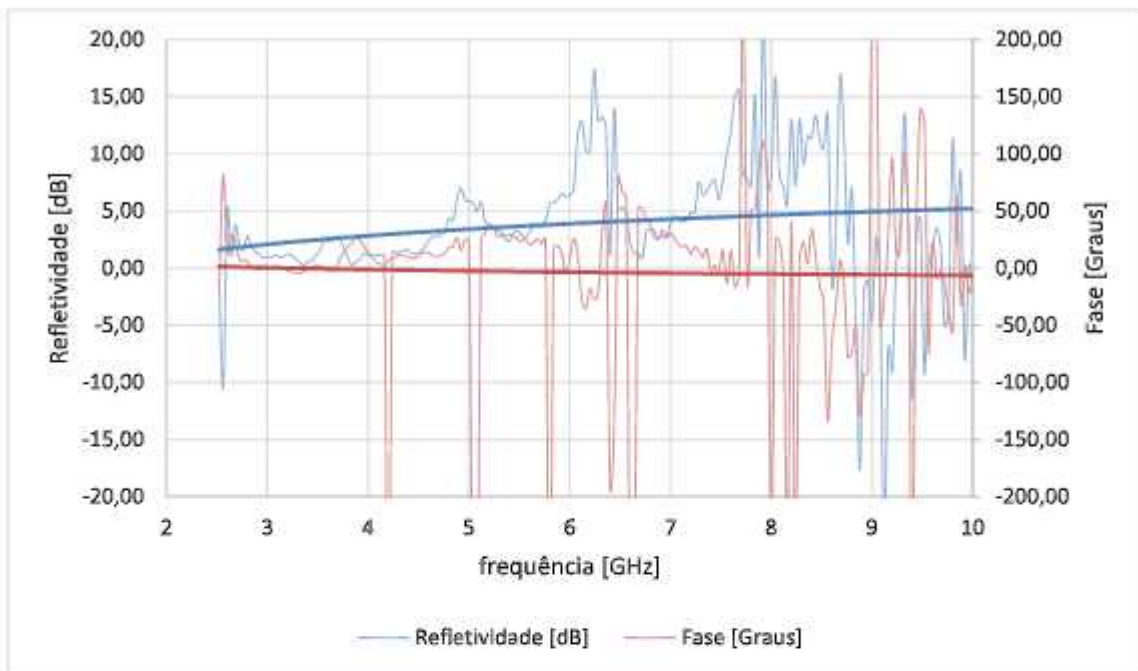
Fonte: de autoria própria

(b) $\theta_i = \theta_r = 70^\circ$



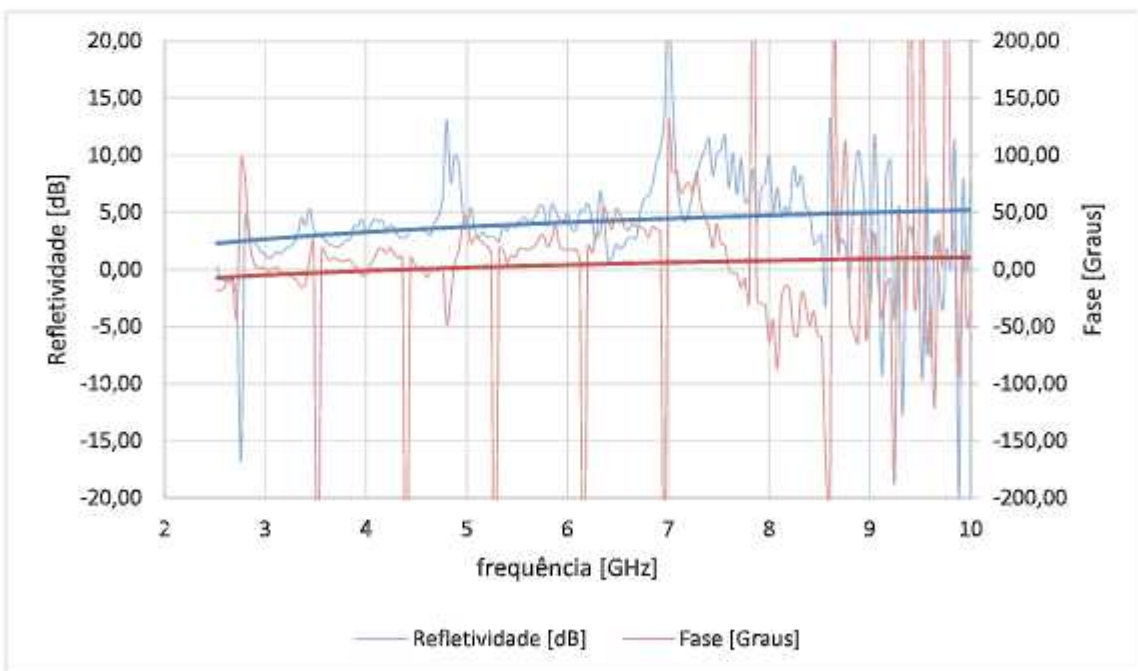
Fonte: de autoria própria

(c) $\theta_i = \theta_r = 60^\circ$



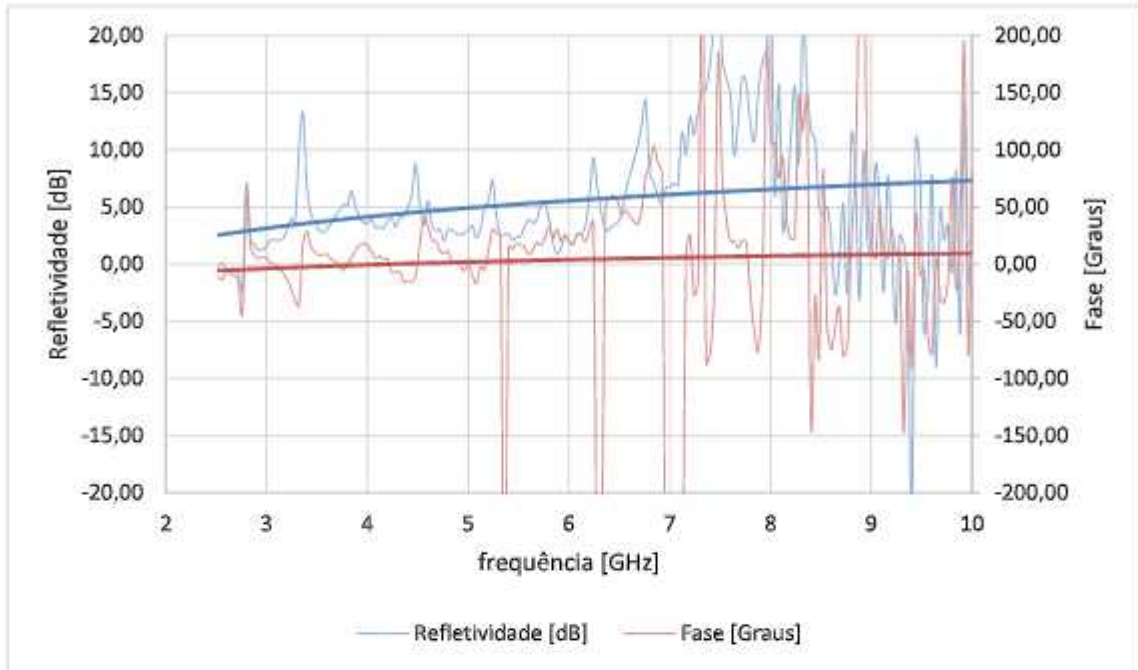
Fonte: de autoria própria

(d) $\theta_i = \theta_r = 50^\circ$



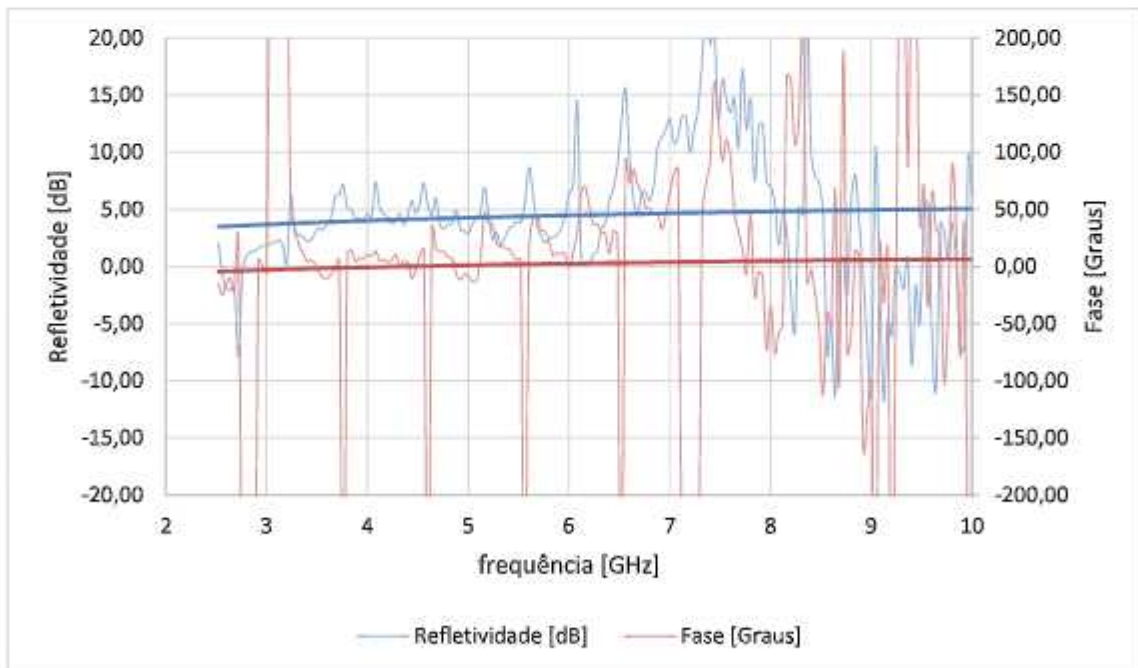
Fonte: de autoria própria

(e) $\theta_i = \theta_r = 45^\circ$



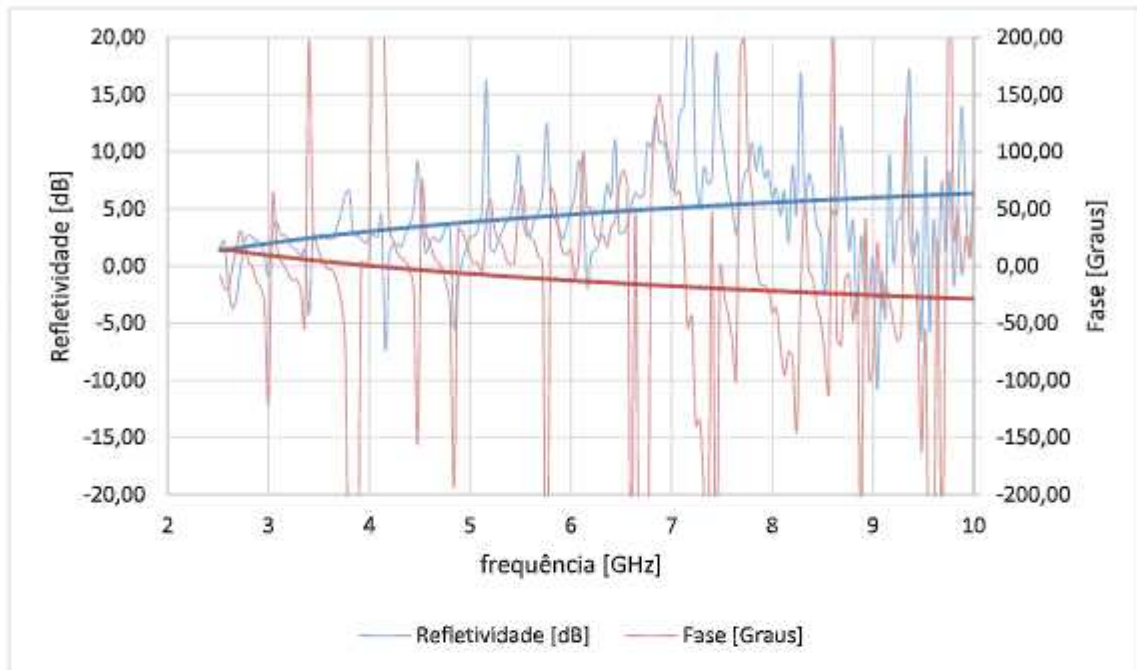
Fonte: de autoria própria

(f) $\theta_i = \theta_r = 40^\circ$



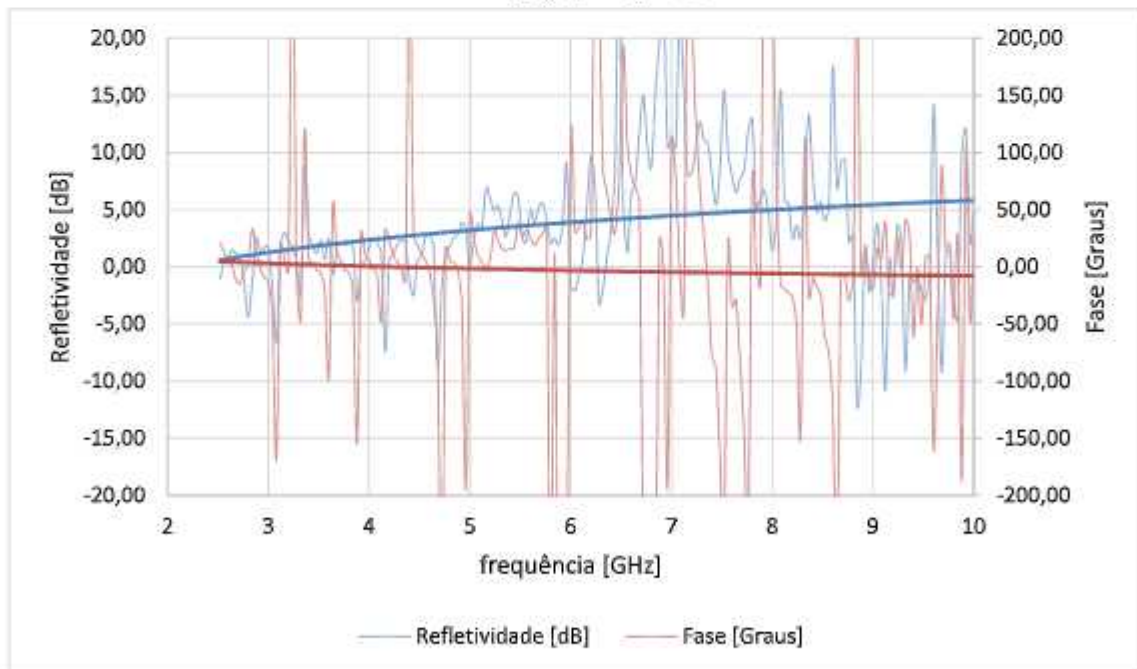
Fonte: de autoria própria

$$(g) \theta_i = \theta_r = 30^\circ$$



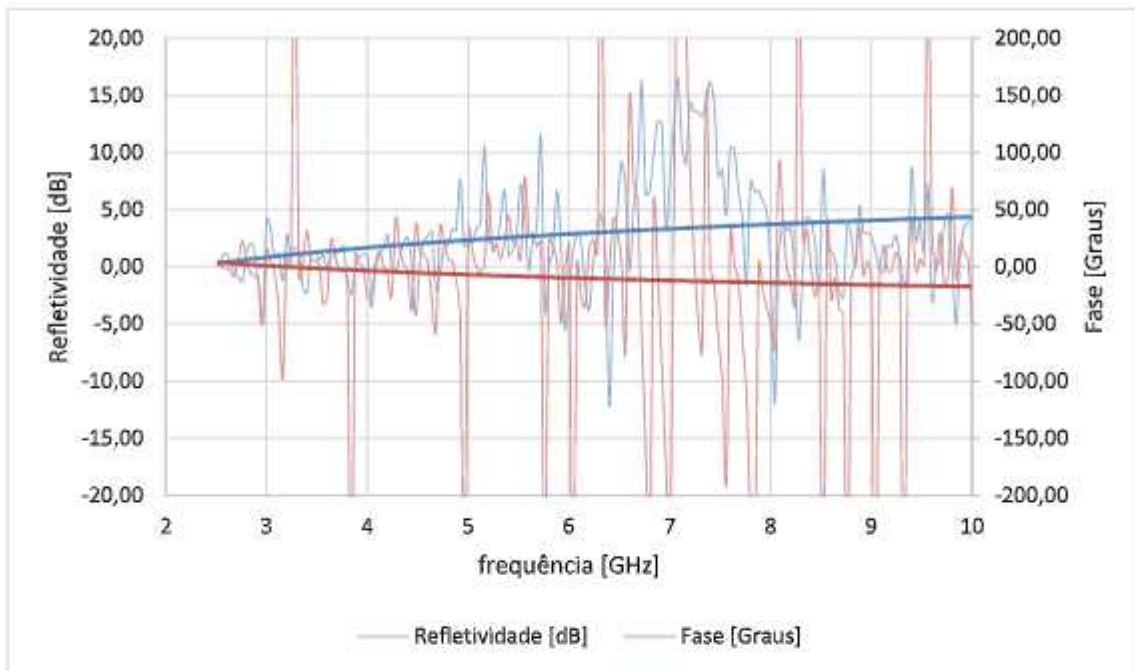
Fonte: de autoria própria

$$(h) \theta_i = \theta_r = 20^\circ$$



Fonte: de autoria própria

$$(i) \theta_i = \theta_r = 10^\circ$$



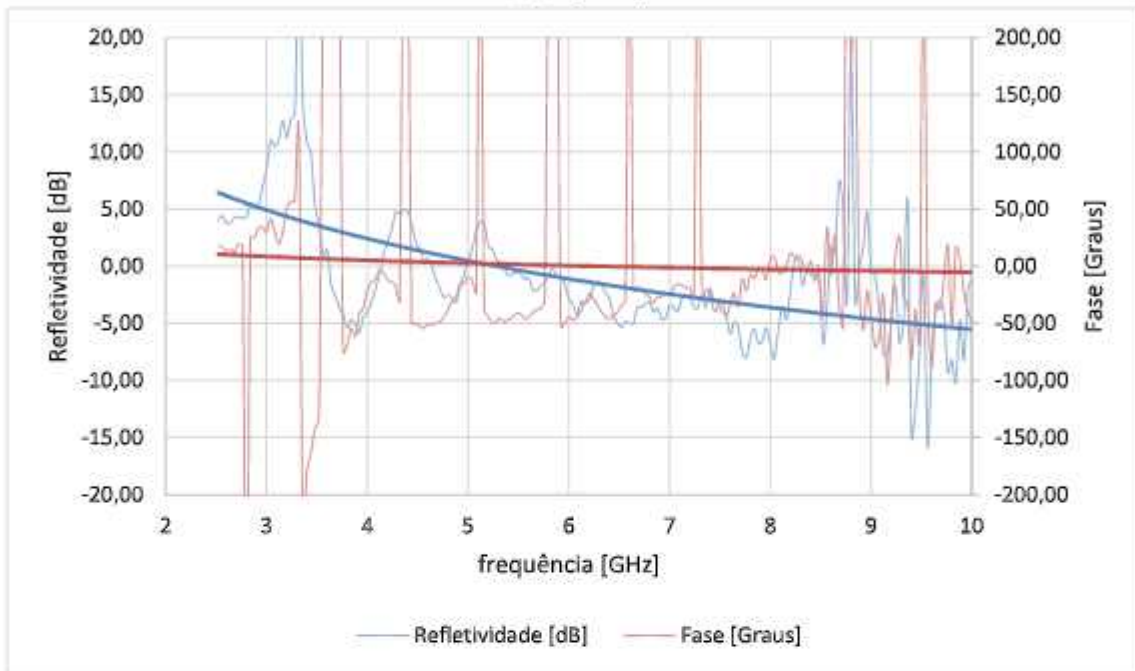
Fonte: de autoria própria

Os resultados apresentados na Figura 18 revelam que, para o ângulo com incidência de 80° em relação a normal Figura 18 (a), a intensidade do sinal refletido pelo porcelanato é muito próximo daquele refletido pela superfície condutora. o MUT (porcelanato) nessa situação apresenta características muito reflexivas, apresentando valores baixos de refletividade próximos a 0 dB em uma faixa de frequências de 4 GHz a 8 GHz e coincidência de fase entre os sinais incidentes e refletidos. Para ângulos de incidência entre 60° e 40° com relação a normal Figura 18 (c), 18 (d), 18 (e) e 18 (f), os valores de refletividade variaram de 2,5 dB para as frequências em torno de 3 GHz, aumentando o valor para 5 dB em frequências próximas à 10 GHz. Nos ângulos com 30° , 20° e 10° de incidência foi verificada uma variação angular, entre 5° para as frequências em torno de 3 GHz e -20° para as frequências em torno de 10 GHz Figura 18 (g), 18 (h) e 18 (i).

A Figura 19 mostra o resultado das medidas de refletividade para o porcelanato considerando agora a polarização perpendicular.

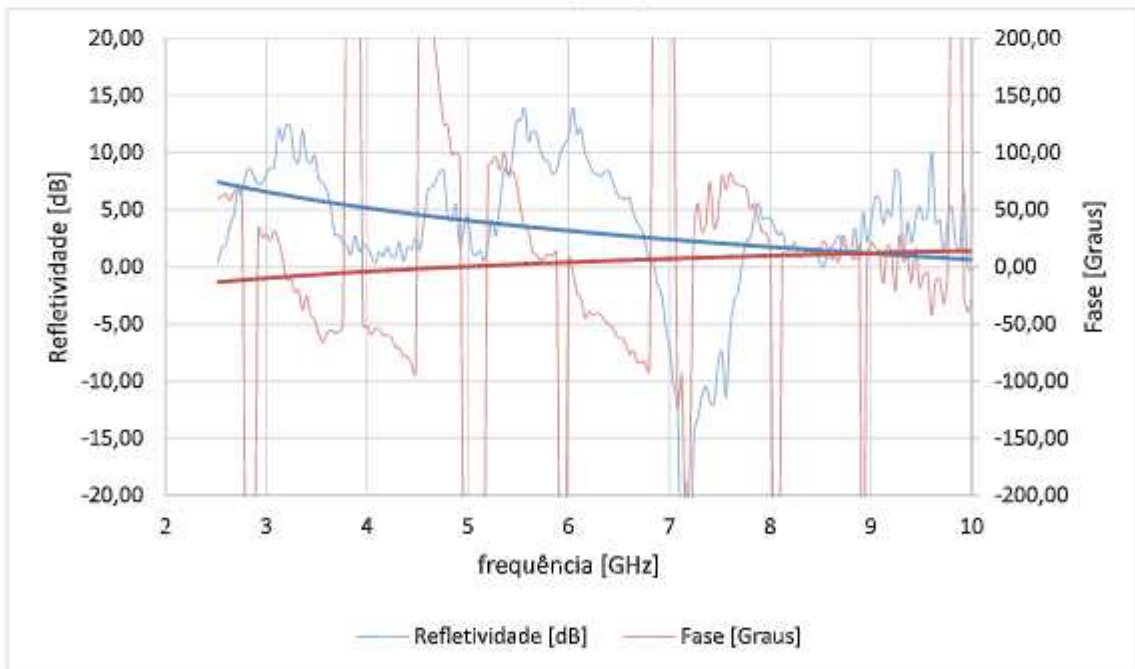
Figura 19 - Módulo e fase da refletividade para o porcelanato na polarização perpendicular – (a) $\theta_i = \theta_r = 80^\circ$; (b) $\theta_i = \theta_r = 70^\circ$; (c) $\theta_i = \theta_r = 60^\circ$; (d) $\theta_i = \theta_r = 50^\circ$; (e) $\theta_i = \theta_r = 45^\circ$; (f) $\theta_i = \theta_r = 40^\circ$; (g) $\theta_i = \theta_r = 30^\circ$; (h) $\theta_i = \theta_r = 20^\circ$; (i) $\theta_i = \theta_r = 10^\circ$

(a) $\theta_i = \theta_r = 80^\circ$



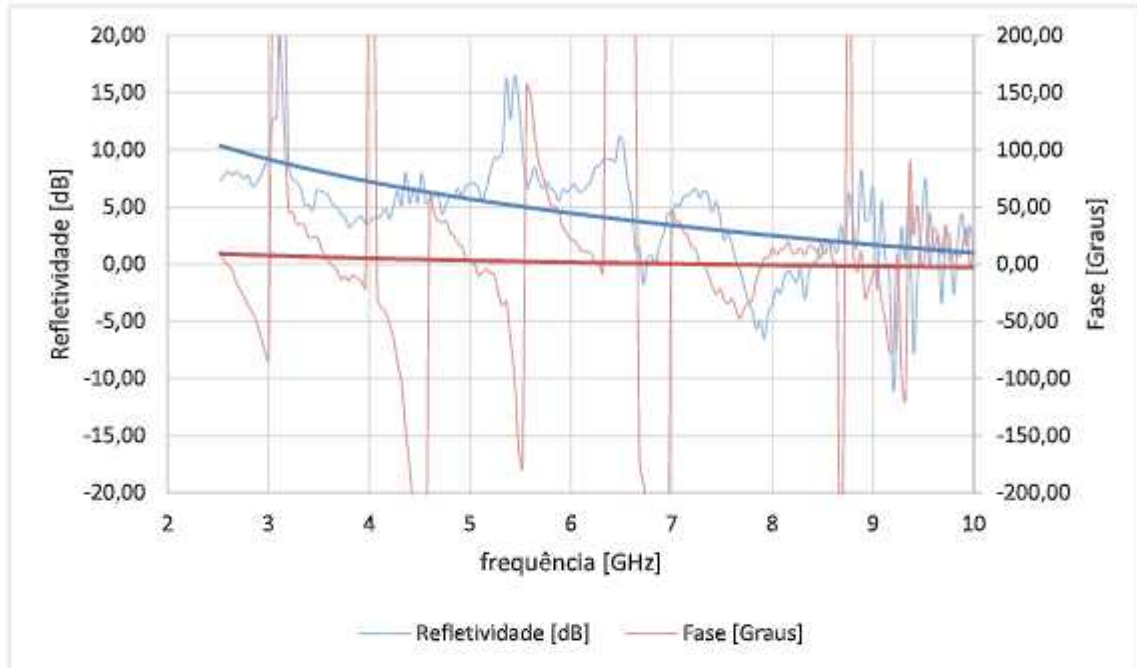
Fonte: de autoria própria

(b) $\theta_i = \theta_r = 70^\circ$



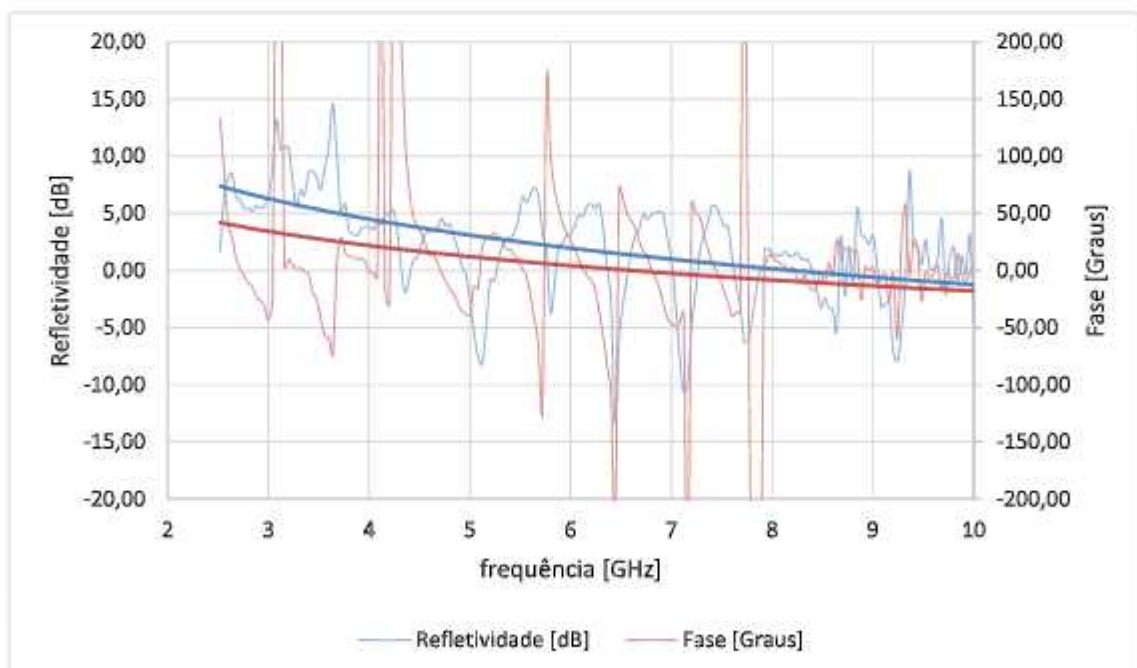
Fonte: de autoria própria

(c) $\theta_i = \theta_r = 60^\circ$



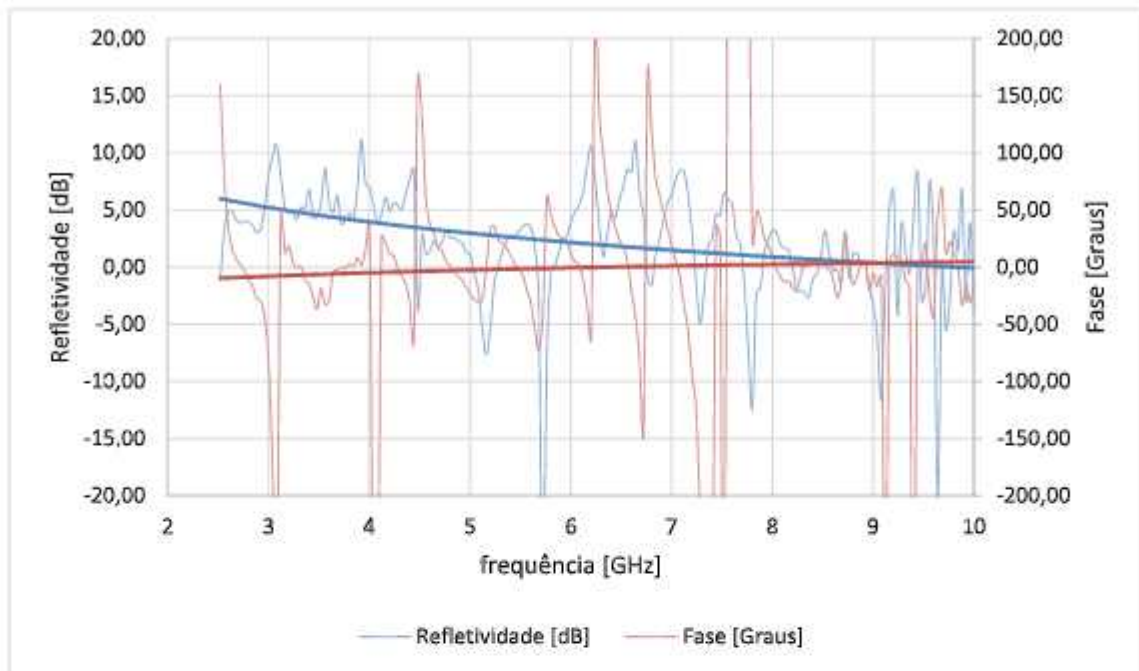
Fonte: de autoria própria

(d) $\theta_i = \theta_r = 50^\circ$



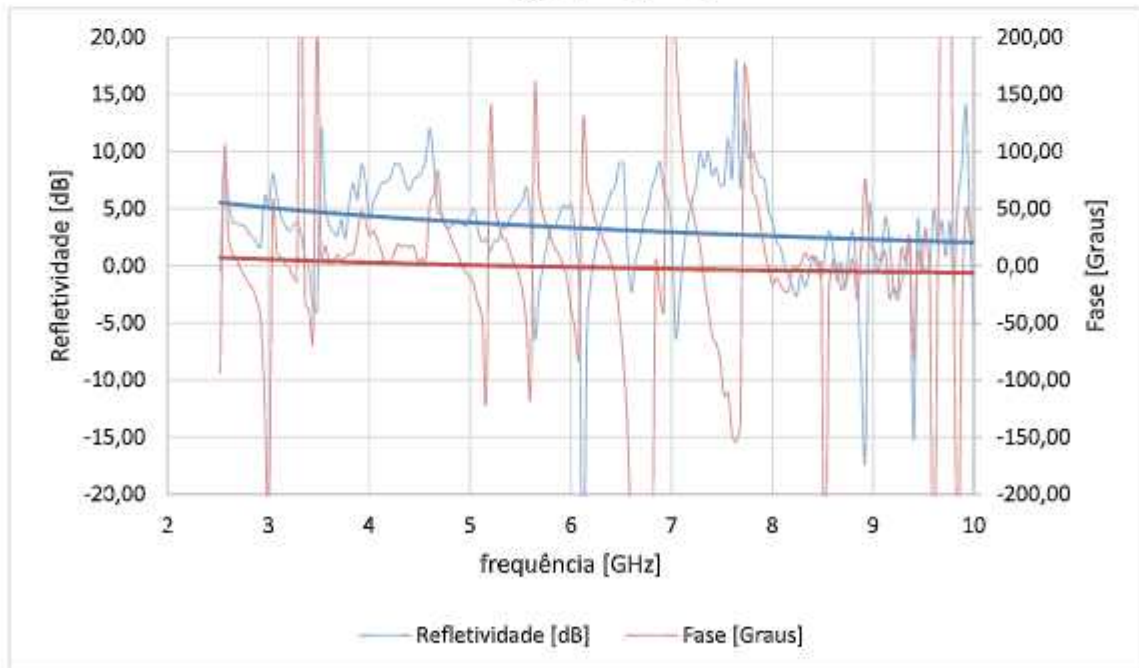
Fonte: de autoria própria

(e) $\theta_i = \theta_r = 45^\circ$



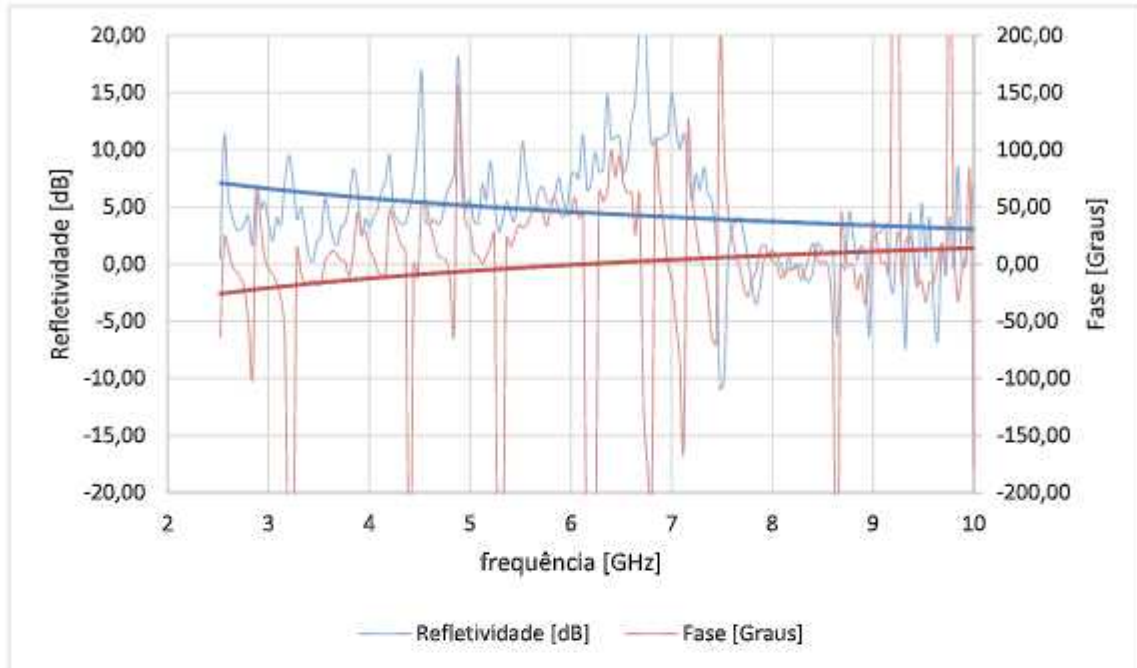
Fonte: de autoria própria

(f) $\theta_i = \theta_r = 40^\circ$



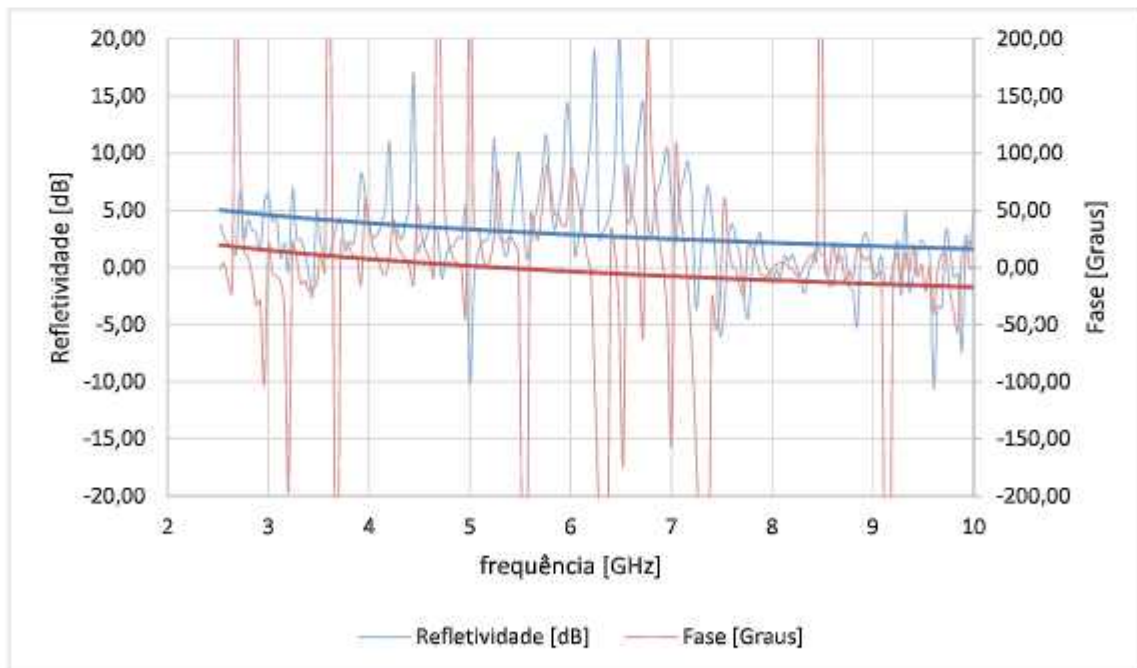
Fonte: de autoria própria

$$(g) \theta_i = \theta_r = 30^\circ$$



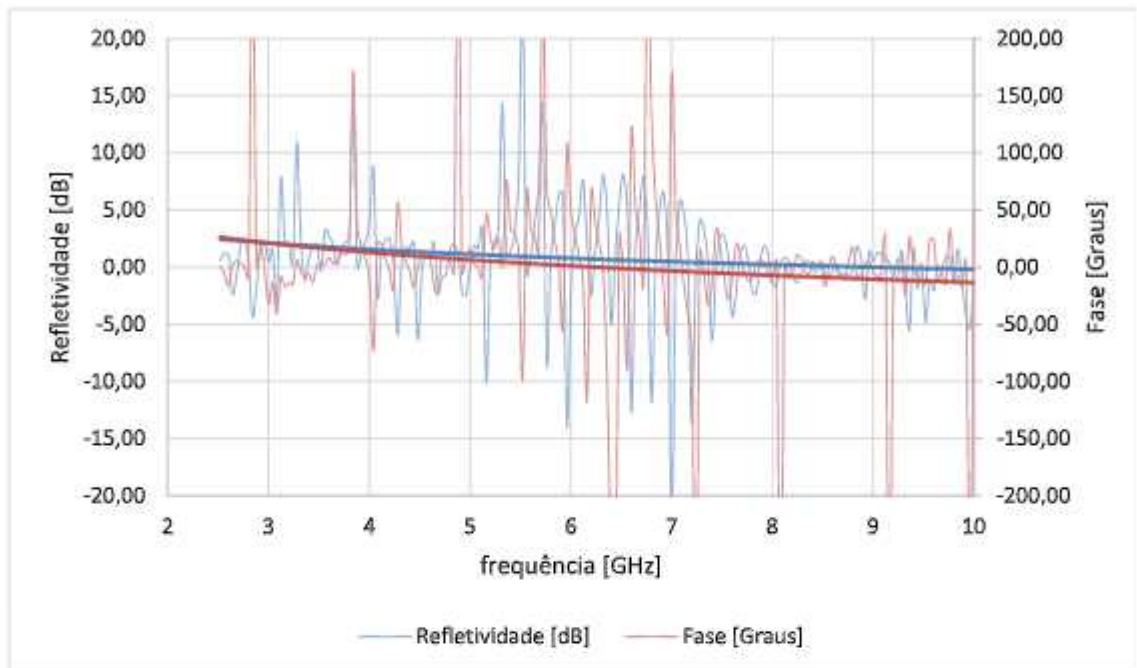
Fonte: de autoria própria

$$(h) \theta_i = \theta_r = 20^\circ$$



Fonte: de autoria própria

$$(l) \theta_i = \theta_r = 10^\circ$$



Fonte: de autoria própria

Os resultados exibidos na Figura 19 apresentam as medidas de refletividade para o porcelanato quando o vetor campo elétrico está perpendicular ao plano da amostra, eles apontam que há redução nos valores da refletividade, assim como para os outros materiais ensaiados quando utilizada essa polarização, e isso ocorre à medida que a frequência aumenta. Quando o ângulo de incidência do material é 80° a refletividade altera-se de 5 dB em frequências próximas de 3 GHz para -60 dB para frequências em torno de 10 GHz Figura 19 (a). Nos ângulos de incidência de 70° e 45° , Figura 19 (b) e 19 (c) a reflexão do material é alta, para eles a refletividade fica próximo de 0 dB em frequências próximas a 10 GHz. A maior variação angular ocorreu quando a antena foi posicionada com 50° em relação à normal, Figura 19 (d), para as frequências em torno de 3 GHz os valores ficaram próximos de 40° oscilando para -20° para as frequências em torno de 10 GHz.

5. CONCLUSÕES

A comunicação através das redes móveis evoluiu e transformou a forma das pessoas se comunicarem na sociedade moderna. A evolução para a rede de quinta geração vai possibilitar a inclusão de vários outros serviços em rede, principalmente aqueles que conectam pessoas também a objetos ou sistemas de controle, incluindo eletrodomésticos, controle de tráfego, segurança e monitoramento de sistemas, equipamentos médicos dentre outros, aumentando a demanda da rede consideravelmente. A utilização de ferramentas que permitem uma melhor implantação e manutenção de sistemas de rádio, é de grande valia visto que, através delas podemos maximizar seu rendimento e cobertura. A exatidão no resultado está relacionada ao modelamento eletromagnético do ambiente, considerando a interação entre a onda eletromagnética e os diversos materiais que o compõe, como paredes, móveis, portas, janelas, etc.

Este trabalho contribuiu para o estudo e determinação de características de refletividade de alguns materiais usados na construção civil, destacando aqueles empregados na construção de lajes, paredes, cobertas e revestimentos, nas faixas de frequência entre 2.500 e 10.000 MHz.

A pesquisa discorreu sobre a caracterização de alguns materiais de construção civil usados no setor construtivo, apresentando peculiaridades e utilização bem como investigou a refletividade de ondas eletromagnéticas incidindo de forma oblíqua nesses materiais. Para obtenção dos resultados da medição da refletividade desses materiais empregados, especificamente o concreto simples, o porcelanato de piso e o gesso de placa, foi construído um arco NRL para posicionamento das antenas e das amostras do material. Foram consideradas as polarizações perpendicular e paralela, quando o vetor campo elétrico está normal ou paralelo ao plano da superfície da amostra respectivamente. Os valores da refletividade foram obtidos pela redução do nível de potência causado pela reflexão na amostra quando comparada a reflexão total, que foi considerada para uma superfície metálica condutora.

As medições foram realizadas no Laboratórios do GTEMA/IFPB. Os valores obtidos mostram que os valores da refletividade para o concreto variaram entre 5 dB e 7,5 dB para frequências em torno de 3 GHz, reduzindo o valor a 0 dB para frequências próximas a 10 GHz na polarização perpendicular e 5 dB para as frequências em torno de 3 GHz, reduzindo o valor para frequências próximas a 10 GHz para a polarização paralela. Para o gesso os resultados apontam que há redução nos valores da refletividade à medida

que a frequência aumenta e são identificados valores de 0 dB em frequências próximas a 10 GHz na polarização perpendicular, para a polarização paralela a refletividade apresentou valores em torno de 0 dB para as frequências de 2.5 GHz a 10 GHz. O porcelanato apresentou valores baixos de refletividade próximos a 0 dB em frequências próximas a 10 GHz na polarização perpendicular e em uma faixa de frequências de 4 GHz a 8 GHz na polarização paralela.

REFERÊNCIAS

- [1] T. S. Rappaport. *Comunicações sem fio: princípios e práticas*, 2ª Edição. São Paulo: Pearson Prentice. 2009.
- [2] E. Dahlman et al., "5G wireless access: requirements and realization," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 12, pp. 42-47, December 2014,
- [3] D. Ferreira, I. Cuiñas, R. F. S. Caldeirinha and T. R. Fernandes, "A review on the electromagnetic characterisation of building materials at micro- and millimetre wave frequencies," *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014)*, The Hague, 2014.
- [4] F. Sagnard and G. E. Zein, "In situ characterization of building materials for propagation modeling: frequency and time responses," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 10, pp. 3166-3173, Oct. 2005.
- [5] C. Lee, S. Zhang, S. S. Bukhari, D. Cadman, J. C. Vardaxoglou and W. G. Whittow, "Complex Permittivity Measurement System for Solid Materials Using Complementary Frequency Selective Surfaces," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 7628-7640, 2020.
- [6] C. C. Ribeiro; J. D. S. Pinto; T. Starling. *Materiais de Construção Civil*, 2ª ed. Revisada. Editora UFMG, 2006.
- [7] L. A. F. Bauer. *Materiais de Construção*. 5ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 1994.
- [8] S. S. Zhekov, O. Franek and G. F. Pedersen, "Dielectric Properties of Common Building Materials for Ultrawideband Propagation Studies [Measurements Corner]," in *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 62, no. 1, pp. 72-81, Feb. 2020
- [9] F. F. Batista. *Caracterização numérica e experimental de materiais dielétricos sólidos através dos parâmetros de espalhamento*. João Pessoa, Paraíba. Instituto Federal da Paraíba, Dissertação (Mestrado – Engenharia Elétrica), 2017.
- [10] M. H. C. Botelho. *Concreto armado, eu te amo, para arquitetos*. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.
- [11] G. C. Isaia. (ed.) *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto, IBRACON, 2005.

[12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

[13] McGraw, David. The measurement of the dielectric constant of concrete pipes and clay pipes, Pro Quest Dissertations And Theses; Thesis (Ph.D.)-Louisiana Tech University, 2013.

[14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto e execução de obras de concreto armado. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

[15] F. Linhales. Caracterização do gesso. Belo Horizonte, Minas Gerais. Universidade Federal de Minas Gerais, Trabalho curso de pós-graduação em Engenharia de Minas e Metalúrgica, 2004.

[16] P. S. Bardella. Análise das propriedades de pastas de gesso de construção reciclado. Campinas. São Paulo. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Tese de Doutorado, 2011.

[17] M. M. C. Canut. Estudo da viabilidade do uso do resíduo fosfogesso como material de construção. Belo Horizonte, Minas Gerais. Universidade Federal de Minas Gerais, Dissertação (Mestrado – Engenharia Civil), 2006.

[18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13207**: Gesso para Construção Civil – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

[19] E. Petrucci. Materiais de construção II. Documento de apoio nº10. Curso de pós-graduação em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico de Lisboa, Portugal. 1992.

[20] M. G. Silva; V. G. Silva. Painéis de vedação. Manual: Instituto Brasileiro de Siderurgia. Centro Brasileiro da Construção em Aço. 2ª Edição. Rio de Janeiro, 2004.

[21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13818**: Placas Cerâmicas para Revestimento - Especificação e Métodos de Ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

[22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15463**: Revestimentos Cerâmicos: Porcelanato. Rio de Janeiro, ABNT 2007.

- [23] Baucia, Jr., J. A. et al. Estudo de fundentes alternativos para uso em formulações de porcelanato. *Cerâmica* [online], 2010, v. 56, n. 339, pp. 262-272. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0366-69132010000300009>>. Epub 08 Out 2010. ISSN 1678-4553.
- [24] M. A. Fernandes. Revestimento de piso com porcelanato: estudo sobre especificação e execução baseado nas percepções dos profissionais envolvidos. Vitória, Espírito Santo. Universidade Federal do Espírito Santo, Dissertação (Mestrado – Engenharia Civil), 2012.
- [25] J. A. Edminister. *Eletromagnetismo*. São Paulo: Mc-Graw-Hill do Brasil, 1980.
- [26] C. A. Balanis. *Advanced Engineering Electromagnetics*, John Wiley & Sons, 1989.
- [27] D. M. Pozar. *Microwave Engineering*, 4ª Edição ed., United States of America: Fourth, 2012.
- [28] J. R. Reitz, F. J. Milford e R. W. Christy. *Fundamentos da Teoria Eletromagnética*, Rio de Janeiro: Campus, 1982.
- [29] I Cuinãs and M. G. Sanchez, "Building material characterization from complex transmissivity measurements at 5.8 GHz," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 48, n°. 8, pp. 1269-1271, Aug. 2000.
- [30] R. A. Stonier. "Stealth aircraft and technology from world war II to the Gulf," Part I: History and background, *Society of Aerospace, Materials and Process Engineering - SAMPE Journal*. vol.27, n° 4, 1991.
- [31] N. C. Currie, *Radar Reflectivity Measurement: Techniques and Applications*. Artech house, Norwood, 1 ed., 1989. Norwood: Artech House, 1989.
- [32] S. M. Lee. *International Encyclopedia of Composites*. New York: VHC Publishers, 1991.
- [33] F. S. Silva. *Obtenção de estruturas híbridas absorvedoras de radiação eletromagnética na faixa de 8-16 GHz, aplicadas no setor aeronáutico*. São José dos Campos, ITA/CTA. Dissertação de mestrado, 2000.

[34] E.F Knott ; J.F. Schaeffer, & M.T. Tuley. Radar Cross Section, Artech House Inc., New Jersey, 1985.

[35] J. A Nemes, and H. N. Jones. Deformation Effects on Microwave Reflectivity. NAVAL RESEARCH LAB WASHINGTON DC, 1987.

[36] Hofmann, Willi, et al. "Advanced calibration method for accurate microwave absorber reflectivity measurements at oblique illumination angles." in IEEE. European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Aug. 2020.