

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, AMBIENTAIS E DE
TECNOLOGIAS**

ERNESTO HENRIQUE RICHTER

**ATENUAÇÃO DE SINAL DE RÁDIO
FREQUÊNCIA POR DIFERENTES MATERIAIS
EM AMBIENTE INDOOR.**

CAMPINAS

2019

ERNESTO HENRIQUE RICHTER

**ATENUAÇÃO DE SINAL DE RÁDIO
FREQUÊNCIA POR DIFERENTES MATERIAIS
EM AMBIENTE INDOOR.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como requisito para obtenção do título de Mestre em Gestão de Redes de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Demanboro.

**PUC-CAMPINAS
2019**

ERNESTO HENRIQUE RICHTER

**ATENUAÇÃO DE SINAL DE RÁDIO FREQUÊNCIA POR
DIFERENTES MATERIAIS EM AMBIENTE INDOOR.**

Dissertação apresentada como exigência para obtenção do título de Mestre em Gestão de Redes de Telecomunicações ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias.

Área de Concentração: Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Demanboro.

Dissertação defendida e aprovada em 17 de dezembro de 2019 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



Prof. Dr. Antônio Carlos Demanboro
Orientador da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Profa. Dra. Lia Toledo Moreira Mota
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Prof. Dr. Paulo Cardieri
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Ficha catalográfica elaborada por Talita Andrade Rodrigues CRB 8/9675
Sistema de Bibliotecas e Informação - SBI - PUC-Campinas

384
R535

Richter, Ernesto Henrique

Atenuação de sinal de rádio frequência por diferentes materiais em ambiente indoor / Ernesto Henrique Richter. - Campinas: PUC-Campinas, 2020.

121 f.: il.

Orientador: Antônio Carlos Demanboro.

Dissertação (Mestrado em Gestão de Redes de Telecomunicações) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2020.

Inclui bibliografia.

1. Telecomunicações. 2. Redes de sensores sem fio. 3. Inovações tecnológicas. I. Demanboro, Antônio Carlos. II. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

Agradecimentos

Primeiramente à Deus.

Aos colegas de trabalho Marcio Miguel e Henrique Yukio, pela ajuda no processo de montagem do setup e na logística com as amostras.

A Emitter Telecomunicações.

Ao Prof. Dr. Antônio Carlos Demanboro, pelo grande apoio, orientação e incentivo no trabalho.

Aos professores do Programa de Mestrado da PUC.

Agradeço a Pontifícia Universidade Católica de Campinas, pela oportunidade da bolsa de 50% no Programa de Mestrado.

Aos colegas de mestrado, Carlos, Guilherme, Leonardo e Marcelo durante este período de aprendizado e trocas de experiências profissionais.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para o que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.
(Martin Luther King)

Resumo

RICHTER, Ernesto Henrique. *Atenuação de sinal de rádio frequência por diferentes materiais em ambiente indoor*. 2019. 121 pgs. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão de Redes de Telecomunicações) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Campinas, 2019.

A atenuação do sinal de rádio frequência, nos diversos materiais construtivos, é um importante parâmetro na elaboração dos mapas de cobertura, nos ambientes indoor. Estimar o valor mais próximo do real para a atenuação, auxilia o projetista a planejar a localização mais adequada para instalação dos transmissores de rádio. Observou-se que a natureza física do problema e os valores de atenuações, utilizados no banco de dados de softwares internacionais, podem não corresponder com as perdas reais por atenuação de Rádio Frequência (RF) dos materiais encontrados em construções civis/industriais tipicamente brasileiras. Desse modo, os somatórios dos valores inseridos no sistema, na etapa de planejamento, podem gerar medições discrepantes de cobertura de sinal. Neste sentido, o presente trabalho avaliou a coleta de atenuações dos tipos mais comuns dos materiais encontrados no mercado nacional. As medidas foram realizadas em paredes de alvenaria cerâmica, tijolo comum e blocos de concreto semi-estrutural. Os materiais foram emulados em câmara de teste especialmente construída, nas frequências de 900 MHz a 5850 MHz, conforme apresentado na metodologia deste trabalho. O comportamento da propagação dos sinais em ambiente indoor, utilizando as atenuações medidas, apresentou alcance diferente em relação aos valores fixados na base de dados dos softwares de predição, sendo que a maioria dos valores obtidos foram maiores que os disponíveis na literatura. Desse modo, propõe-se que os resultados obtidos das atenuações medidas, nas faixas de frequência ensaiadas, sejam criteriosamente avaliados pelos profissionais de TI/TELECOM, o que permitirá a realização de projetos mais adequados à realidade nacional. Conclui-se que os valores de atenuações obtidos, desde que corretamente utilizados, podem ser adotados nas elaborações de projetos de cobertura de sinal com maior produtividade, qualidade e menor interferência entre os transmissores e antenas.

Palavras-chave: Atenuação, sinal de rádio frequência, cobertura de sinal, ambiente construído, materiais.

Abstract

RICHTER, Ernesto Henrique. *Radio frequency signal attenuation by different materials in indoor environment 2019. 121 pgs. Dissertation (Master in Telecommunication Network Management) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Campinas, 2019.*

The attenuation of the radio frequency signal in the various construction materials is an important parameter in the elaboration of coverage maps in indoor environments. Estimating the closest to actual value for attenuation helps the designer to plan the most suitable location for installing radio transmitters. It was observed that the physical nature of the problem and the attenuation values used in the international software database may not correspond to the actual Radio Frequency (RF) attenuation losses of materials found in typically Brazilian civil / industrial constructions. Thus, the sum of the values entered in the system at the planning stage can lead to discrepant measurements of signal coverage. In this sense, the present work evaluated the attenuation collection of the most common types of materials found in the national market. The measurements were made on ceramic masonry walls, common brick and semi-structural concrete blocks. The materials were emulated in a specially built test chamber at frequencies from 900 MHz to 5850 MHz, as presented in the methodology of this work. Signal propagation behavior in indoor environment, using the measured attenuations, presented different range in relation to the values set in the prediction software database, and most of the obtained values were higher than those available in the literature. Thus, it is proposed that the results obtained from the measured attenuations, in the tested frequency bands, be carefully evaluated by the IT / TELECOM professionals, which will allow the realization of projects more suited to the national reality. It is concluded that the obtained attenuation values, if properly used, can be adopted in the elaboration of signal coverage projects with higher productivity, quality and less interference between transmitters and antennas.

Keywords: Attenuation, radio frequency signal, signal coverage, built environment, materials.

Lista de figuras

Figura 1. Software de predição de cobertura de sinal Wi-Fi	18
Figura 2. Processo construtivo nos EUA	23
Figura 3. Construção em alvenaria no Brasil	25
Figura 4. Predição de cobertura em 2.4GHz.	28
Figura 5. Configuração padrão do equipamento de teste da NSA: Vista lateral.....	33
Figura 6. Exemplo de propagação ONE SLOPE.	42
Figura 7. Representação da propagação do modelo Mult-Wall.....	44
Figura 8. Fenômeno da difração.....	47
Figura 9. Reflexão.....	48
Figura 10. Refração.	49
Figura 11. Dispersão.....	49
Figura 12. Diagrama de blocos da proposta do setup.....	51
Figura 13. Analisador de Espectro	52
Figura 14. Gerador de RF	53
Figura 15. Antena Aaronia Log periódica	54
Figura 16. Diagrama de irradiação antena Log periódica.....	55
Figura 17. Diagrama de ganho em dBi da antena Aaronia.	56
Figura 18. Antena Hyperlink HG908P.....	56
Figura 19. Diagrama de irradiação antena HG908P.	57
Figura 20. Antena L-com RE11DP.	58
Figura 21. Diagrama de irradiação antena RE11DP.	59
Figura 22. Antena L-com HG2458-09P.	59
Figura 23. Diagrama de irradiação da antena HG2458-09P.....	60
Figura 24. Materiais de construção utilizados, a) Blocos estruturais; b) Tijolos;.....	61
Figura 25. Parede de tijolos de 6 furos.	63
Figura 26. Parede de blocos cerâmicos estrutural de 14 cm	64
Figura 27. Parede de tijolos a vista.	65
Figura 28. Parede de bloco semi-estrutural de concreto.	66
Figura 29. Parede de bloco semi-estrutural de concreto de 14 cm.....	67
Figura 30. Medida do sinal sem o material construtivo na câmara de teste.....	68
Figura 31. Processo de construção da câmara de teste.....	71
Figura 32. Uma amostra sendo submetida a medida de atenuação.	72
Figura 33. Estrutura para coleta de dados.	73
Figura 34. Disposição do material na estrutura.....	74
Figura 35. Medição de parede de tijolos cerâmicos de 6 furos.	
Figura 36. Medida realizada na posição vertical.	75
Figura 37. Medição de parede de blocos de cerâmica estrutural	75
Figura 38. Medição de parede de tijolos cerâmicos do tipo à vista.....	76
Figura 39. Vista do setup de coleta de dados para tijolos à vista.	76
Figura 40. Medição de parede blocos de concreto semi-estrutural.	77
Figura 41. Vista do setup de coleta de dados para blocos de concreto semi-estrutural.	77
Figura 42. Medição de parede blocos de concreto semi-estrutural de 14 cm.....	77
Figura 43. Captura de espectro da perda de cabo.	79
Figura 44. Predição de cobertura utilizando valores para 915 MHz, 10 dB de atenuação, padrão encontrado no software de predição.	97

Figura 45. Predição de cobertura de sinal utilizando valores para 915 MHz, 15 dB de perda.	98
Figura 46. Predição de cobertura de sinal utilizando valores para 1920 MHz, 10 dB de atenuação, padrão encontrado no software de predição.	99
Figura 47. Predição de cobertura de sinal utilizando valores para 1920 MHz, 17 dB de perda.	99
Figura 48. Predição de cobertura de sinal utilizando valores para 2400 MHz, 10 dB de atenuação, padrão encontrado no software de predição.	100
Figura 49. Predição de cobertura de sinal utilizando valores para 2400 MHz, 17 dB de perda por atenuação.....	101
Figura 50. Predição de cobertura de sinal utilizando valores para 5150-5350 MHz, 10 dB de perda por atenuação, padrão encontrado no software de predição.....	101
Figura 51. Predição de cobertura de sinal utilizando valores para 5150-5350 MHz, 19 dB de perda por atenuação.	102
Figura 52. Predição de cobertura de sinal utilizando valores para 5470 MHz, 10 dB de perda por atenuação, padrão encontrado no software de predição.	103
Figura 53. Predição de cobertura de sinal utilizando valores para 5470 MHz, 21 dB de perda por atenuação.....	103
Figura 54. Predição de cobertura de sinal utilizando valores para 5800 MHz, 10 dB de perda por atenuação, padrão encontrado no software de predição.	104
Figura 55. Predição de cobertura de sinal utilizando valores para 5800 MHz, 19 dB de perda por atenuação.....	104

Lista de tabelas

Tabela 1. Limites Gerais de Emissão	30
Tabela 2. Configurações do <i>setup</i> da figura 5.	34
Tabela 3. Valores de atenuações para vários sistemas de construção internos.	39
Tabela 4. Fator de atenuação de piso.....	44
Tabela 5. Coeficientes de perda de potência N para cálculo de perda de transmissão interna.	46
Tabela 6. Fatores de perda de penetração de piso, Lf (dB) com n sendo o número de andares penetrados, para cálculos de perdas internas ($n \geq 1$).....	46
Tabela 7. Informações técnica da antena Aaronia 30180.....	54
Tabela 8. Informações técnicas das antenas HG908P	57
Tabela 9. Informações técnicas das antenas RE11DP	58
Tabela 10. Informações técnicas das antenas HG2458-09P	60
Tabela 11. Materiais construtivos.....	61
Tabela 12. Perda por atenuação em cabos de conexão Lmr-240.....	70
Tabela 13. Resultado de atenuações para tijolos de cerâmicas não estrutural de 6 furos.	81
Tabela 14. Resultado de atenuações para blocos cerâmico estrutural.	83
Tabela 15. Resultado de atenuações para tijolos comuns do tipo à vista.....	85
Tabela 16. Resultado de atenuações para blocos de concreto semi-estrutural – 9 cm....	87
Tabela 17. Resultado de atenuações para blocos de concreto semi-estrutural.....	89
Tabela 18. Relação de atenuações dos materiais construtivos.....	90

Lista de gráficos

Gráfico 1. Perda do sinal sem as amostras de parede para as frequências em estudo.	78
Gráfico 2. Gráfico de médias de atenuações para tijolos cerâmicos não estruturais de 6 furos.....	80
Gráfico 3. Médias de atenuações para blocos cerâmico estrutural com largura de 14 cm.	82
Gráfico 4. Gráfico de médias de atenuações para tijolos comuns do tipo à vista.	84
Gráfico 5. Gráfico de médias de atenuações para bloco estrutural de concreto de 9 cm largura.	86
Gráfico 6. Médias de atenuações para bloco estrutural de concreto de 14 cm largura....	88
Gráfico 7. Medidas em 915 MHz, com os limites de atenuações superiores e inferiores.	91
Gráfico 8. Medidas em 1920 MHz, com os limites de atenuações superiores e inferiores para as frequências na pesquisa.....	92
Gráfico 9. Medidas em 2400 MHz, com os limites de atenuações superiores e inferiores para as frequências na pesquisa.....	93
Gráfico 10. Medidas em 5150 MHz, com os limites de atenuações superiores e inferiores para as frequências na pesquisa.....	94
Gráfico 11. Medidas em 5470 MHz, com os limites de atenuações superiores e inferiores para as frequências na pesquisa.....	95
Gráfico 12. Medidas em 5800 MHz, com os limites de atenuações superiores e inferiores para as frequências na pesquisa.....	95

Lista de abreviaturas e siglas

ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ABNT	Agência Brasileira de Normas Técnica
CISPR	International Special Committee on Radio Interference
CW	Continuous Wave – Onda Continua
dB	Decibel
dBm	Decibel miliwatts
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunications
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power
EMC	Electromagnetic compatibility
EMI	Electromagnetic interference
FSS	Frequency Selective Surface
GHZ	Giga-hertz
GPiB	General Purpose Interface Bus
GSM	Global System for Mobile Communications
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IOT	Internet das Coisas
IP	Internet protocol
ITU-R	International Telecommunication Union - Radiocommunication Sector
LAN	Local Area Network
LF	Low frequency
LoRa	Long Range
LOS	Line of sight
NSA	Normalized Site Attenuation
MHZ	Mega-hertz
NLOS	Non line of sight
OATS	Open Area Test Site
RBW	Resolution bandwidth
RF	Rádio Frequência
RSSI	Received Signal Strength Indication
RX	Receptor
SS	Site Survey
TX	Transmissor
UNII	Unlicensed National Information Infrastructure
USB	Universal Serial Bus

VBW	Video Bandwidth
VoWlan	Voice over Wireless LAN
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio

Sumário

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Justificativa	17
1.2. Objetivos	20
1.3. Organização do trabalho	20
2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA	22
2.1. Modelo construtivo utilizado nos Estados Unidos	22
2.2. Modelo construtivo utilizado no continente Europeu	23
2.3. Modelo construtivo no Brasil	24
2.4. Ferramentas de predição	26
2.5. Regulamentação ANATEL sobre as frequências	30
2.6. Câmara Semi-Anecoica	32
2.7. Principais trabalhos relacionados a medidas de atenuação em materiais construtivos	34
3. MODELOS DE PROPAGAÇÃO	38
3.1. Atenuação	38
3.2. Recomendação ITU-R P.2040	40
3.3. Propriedade elétrica dos materiais	40
3.4. Modelo de Propagação no Espaço Livre	41
3.5. Modelo de Propagação One Slope	42
3.6. Modelo De Propagação Multi – Wall	43
3.7. Modelo ITU-R P.1238	44
3.8. Difração, Reflexão, dispersão e absorção	46
3.8.1. Difração	47
3.8.2. Reflexão	47
3.8.3. Refração	48
3.8.4. Dispersão	49
3.8.5. Absorção	50
4. MATERIAIS E MÉTODOS	51
4.1. Equipamentos para medição	51
4.1.1. Analisador de Espectro - Advantest R3465	51
4.1.2. Gerador de Rádio Frequência – ROHDE & SCHWARZ – SMT 06	52
4.2. Antena para a medição do sinal	53
4.3. Materiais	61
4.4. Lista dos materiais e suas variantes	62

4.4.1.	Bloco cerâmico não estrutural de 6 furos	62
4.4.2.	Bloco cerâmico estrutural de 14 cm	63
4.4.3.	Tijolo comum do tipo à vista	64
4.4.4.	Bloco semi-estrutural de concreto - 9 cm de vedação	65
4.4.5.	Bloco semi-estrutural de concreto 14 cm de vedação	66
4.5.	Calibração do sistema de medição.	67
4.6.	Validação do ambiente de emulação.	70
4.7.	Setup.....	72
5.	RESULTADOS	78
5.1.	Medidas de atenuações nos materiais	79
5.1.1.	Bloco cerâmico não estrutural - largura 14,4 cm	80
5.1.2.	Bloco cerâmico estrutural - largura 14 cm	81
5.1.3.	Tijolo comum com assentamento tipo à vista - largura de 9 cm.....	83
5.1.4.	Bloco de concreto semi-estrutural largura 9 cm	85
5.1.5.	Bloco de concreto semi-estrutural largura 14 cm	87
5.2.	Valores de Atenuação na literatura para as frequências medidas	90
5.3.	Comparação da atenuação (Base de dados Software x Atenuação medida)	96
5.3.1.	Predição de cobertura de sinal utilizando a base de atenuação de blocos de cerâmica estrutural.	97
6.	DISCUSSÃO	105
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	108
I.	REFERÊNCIAS.....	110
	APÊNDICES	114
	APÊNDICE A – PERDA DO SINAL SEM O MATERIAL CONSTRUTIVO.....	115
	APÊNDICE B - MEDIDAS DE ATENUAÇÕES DAS PAREDES	116
	APÊNDICE C – GRÁFICO GERADO A PARTIR DAS 30 MEDIDAS DE COLETAS DE SINAL.....	117
	APÊNDICE D – VERIFICAÇÃO DE SAÍDA DE POTÊNCIA DO GERADOR DE RF.....	121

1. INTRODUÇÃO

Com a necessidade de aumentar a produtividade no mapeamento e distribuição de ponto de acesso wireless em ambientes indoor, foram criadas ferramentas de softwares utilizando cálculos matemáticos para determinar o melhor ponto de posicionamento das fontes transmissoras de sinais.

Os softwares de predição, como o WinProp, Airmagnet, Ekahau e LanPlanner, possuem a sua base de dados própria e partem do mesmo princípio: carregar uma planta vetor e/ou imagem, calibrar a área de estudo com escala em pixel e inserir informações de potência de transmissão, canalização e atenuação das estruturas na planta (AIRMAGNET, EKAHAU, LANPLANNER, WINPROP; 2019).

Os softwares possuem ferramentas gráficas para a elaboração de áreas de cobertura, com o intuito de prever a melhor solução para um determinado objetivo, porém a tarefa não é fácil, uma vez que cabe ao técnico especializado interpretar os valores que devem ser inseridos no software. O valor inserido no sistema poderá variar e apresentar resultado com discrepâncias para mais ou para menos no número de fontes transmissoras, na predição (ZVANOVEC, PECHAC, KLEPAL; 2003).

Os modelos numéricos utilizados em softwares para a determinação da cobertura de sinal são complexos, além de exigirem a adoção de variáveis ambientais, que são atribuídas aos modelos matemáticos, onde serão calculadas as perdas entre o emissor e o receptor.

No ambiente construído, encontram-se fatores que contribuem para a atenuação do sinal, podendo aumentar a perda conforme a divisão e concentração de salas, escadarias, corredores, halls, shafts e paredes (ANDERSEN, RAPPAPORT, YOSHIDA; 1995). Além das barreiras físicas, outros fatores podem dificultar a complexidade dos cálculos e implicam em diferentes coeficientes de atenuação, podendo influenciar as medidas de uma predição (ZVANOVEC, PECHAC, KLEPAL; 2003). Além disso, as características dos materiais que constituem os obstáculos físicos como a espessuras das paredes, os revestimentos

e os tipos de acabamentos, aumentam o grau de dificuldade dos cálculos e imprecisões dos resultados (ITU-R, 2015).

As perdas causadas pela absorção do sinal pelos materiais construtivos do ambiente estão diretamente ligadas ao comprimento de onda do sinal, pois com o aumento da frequência menor será o comprimento de onda, e conseqüentemente, maiores serão os obstáculos para o sinal no ambiente.

Segundo ANDERSEN, RAPPAPORT e YOSHIDA (1995):

“Para diferenciar os fenômenos de propagação, pesquisadores frequentemente classificam os edifícios com as seguintes categorias: casas residenciais em subúrbio, casas residenciais em áreas urbanas, edifícios tradicionais de escritórios antigos com paredes fixas divisórias, edifícios de plano aberto com móveis painéis de parede (divisórias leves), edifícios de fábrica, mercearias, lojas de varejo e arenas esportivas. Dentro de um edifício, a geometria de propagação pode ser classificada como linha de visão (LOS) onde o transmissor e o receptor são visíveis um ao outro ou obstruídos, onde os objetos no local bloqueiam uma propagação visível.”

No cenário da propagação, o meio de transmissão é um importante elemento, as características e efeitos devem ser estudados, podendo ser utilizados modelos estatísticos e determinísticos para predições de cobertura.

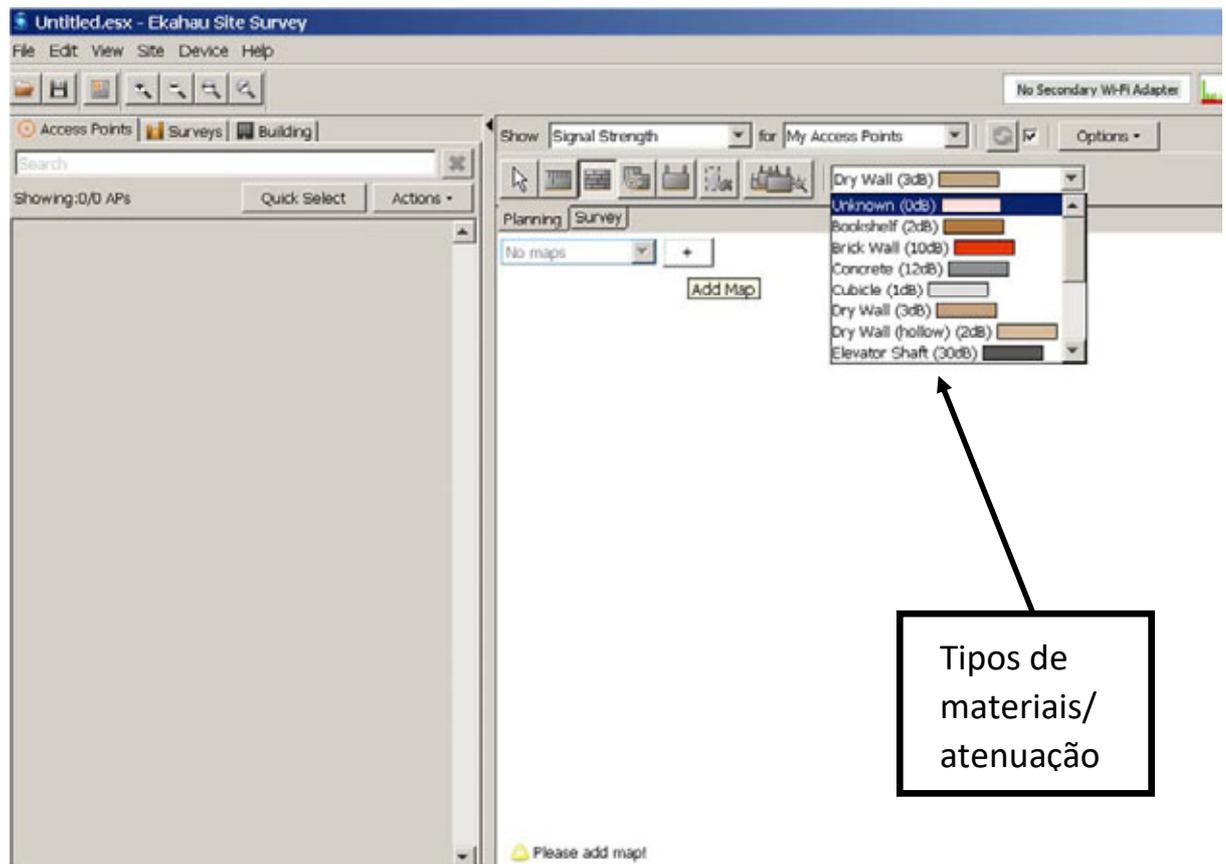
Neste trabalho, serão apresentados os modelos de propagação para as faixas de frequência de: 900-930, 1900-1930, 2400-2483,5 e 5150 à 5850MHz, em ambientes fechados.

1.1. Justificativa

Uma predição de cobertura de sinal incorreta, utilizando dados de atenuação de materiais com características diferentes dos encontrados no Brasil, pode levar a um planejamento de cobertura de sinal inconsistente e acarretar áreas de sombra de sinal, impossibilitando a conectividade para determinadas aplicações, sendo elas Wi-Fi, *Cordless* IP, rede sensores sem fio (RSSF), entre outros dispositivos de comunicação utilizando rádio frequência.

Em VoWlan (*Voice Over WLAN*) utiliza-se a premissa de mapa de cobertura com sinais melhores que -65 dBm de intensidade, sendo que qualquer planejamento de distribuição de células de cobertura em ambiente densamente ocupado é um desafio, pois as estruturas construtivas em determinadas plantas permitem distinguir as espessuras utilizadas em seus projetos, mas não ilustram os materiais utilizados em sua construção, deixando como única opção a adoção dos valores padrões encontrados no *software* de predição para a atenuação, conforme ilustrado na figura 1. A partir da distribuição de pontos de acesso, com a simulação baseada em *software*, deve-se levar em consideração os cuidados com a alocação adequada do canal utilizado no transmissor. Neste sentido, é necessário minimizar os efeitos da interferência intra-sistema, como a degradação do sinal causada pela interferência co-canal, que é a reutilização do mesmo canal em uma célula vizinha, além das redes interferentes de origem extra VoWlan (LEE et al., 2007).

Figura 1. Software de predição de cobertura de sinal Wi-Fi



Fonte: Elaboração própria.

Com base na previsão de cobertura realizada, a densidade de pontos de acesso poderá ser imprecisa, gerando maior ou menor número de transmissores, tendo em vista os obstáculos que aquele ambiente possui.

Com as tecnologias de redes sensores sem fio evoluindo dia após dia, cada vez mais o seu uso está sendo aplicado a diversos eletrônicos domésticos, com a principal característica de aumentar a automatização e comunicação entre os dispositivos. O conceito de *smart home* traz uma gama de recursos, permitindo aos usuários controlar seus dispositivos móveis, gerando a necessidade de abrangência de sinal cada vez maiores e altas velocidades de transmissão. Os valores de atenuações são parâmetros fundamentais para aumentar a confiabilidade dos mapas de calor de sinal promovendo, via sua adoção, desempenhos próximos a estudos de rádio cobertura medidos localmente (BREEZENET, 2019).

No Brasil, é muito utilizada, na construção civil, a técnica que faz uso do bloco estrutural, no qual os pavimentos são construídos com blocos de concreto que são reforçados internamente, formando uma parede autoportante com pilares e vigas embutidas nos blocos, pavimento por pavimento. Neste sentido, definir os parâmetros de atenuações sobre as espessuras padrões de blocos estruturais colabora para o planejamento dos estudos de rádio frequência em aplicações de escritórios, ambientes comerciais, apartamentos, entre outros fins.

Com a verticalização acentuada de alguns condomínios de médio a alto padrão, algumas edificações verticais, dentre as mais altas em construção no Brasil, aumentaram a utilização de armação de aço e materiais reforçados, visando garantir a rigidez e segurança necessárias; em contrapartida, essas construções podem produzir paredes com enormes fatores de atenuação para os sinais eletromagnéticos. Neste sentido, a condição física dos materiais necessita ser estudada previamente, caso se pretenda elaborar o plano de cobertura de sinal para as incorporadoras. Assim, seria possível contemplar no imóvel um mapa de cobertura, indicando os locais com melhor aproveitamento do sinal Wi-Fi, telefonia e automação residencial para seus futuros clientes.

Dentro deste contexto, pode-se relacionar os valores de atenuação para as seguintes composições:

- Tipo dos materiais de construção de edificação.
- Moveis com que são equipados os ambientes.
- Presença e tipo de divisórias e aberturas (Janelas, portas e etc).
- Taxa de ocupação da edificação ao longo do dia (movimentação de pessoas).
- Número e natureza dos pavimentos da edificação.
- Composição dos revestimentos.

1.2. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é propor uma metodologia alternativa de baixo custo e utilizá-la para encontrar os valores das atenuações dos materiais construtivos mais utilizados em edificações brasileiras, a partir de um modelo de estrutura de medição que permita medir a atenuação absorvida na passagem do sinal de rádio frequência sobre os materiais.

Os objetivos específicos, são:

- Determinar a atenuação do sinal sofrida sobre as fontes de sinais de 915 MHz mais utilizados em IoT, bem como sinais na faixa de 1900 MHz, *Cordless IP* e faixa *Wi-Fi*, abrangendo as faixas de frequências de 2.4 GHz e 5.0 GHz.
- Discutir a absorção do sinal de rádio frequência nos materiais mais utilizados em ambiente construídos.
- Comparar os resultados apresentados com as ferramentas de predição avaliadas, utilizando a base de dados disponível na literatura internacional.

1.3. Organização do trabalho

O trabalho está organizado com a seguinte distribuição de capítulos:

Capítulo 2 – Neste capítulo, é apresentada a revisão bibliográfica da dissertação, onde estão abordados os modelos construtivos, normas, os

parâmetros envolvidos na construção de uma câmara semi-anecóica e os principais trabalhos ligados ao tema.

Capítulo 3 – Apresenta os modelos de propagação, discutindo os conceitos dos modelos matemáticos para o cálculo de propagação de sinal, bem como os fenômenos do sinal de rádio frequência no meio físico.

Capítulo 4 – Apresenta os materiais e métodos que foram utilizados na elaboração do setup, bem como a estrutura para a realização das medidas de atenuação do sinal no modelo proposto, além dos parâmetros necessários para configuração do ensaio.

Capítulo 5 – São apresentados os resultados obtidos durante as coletas, sendo feita análise dos valores medidos, visando comparar os valores coletados e valores simulados.

Capítulo 6 – É feita a discussão, com ênfase nas dificuldades encontradas na obtenção dos resultados.

Capítulo 7 – São feitas as considerações finais do trabalho, sendo apresentada uma perspectiva para trabalhos futuros a partir deste tema, visando avançar nas pesquisas em atenuações de sinal sobre os materiais.

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1. Modelo construtivo utilizado nos Estados Unidos.

Nos Estados Unidos, a utilização dos materiais é muito diferente daqueles utilizados no Brasil, sendo muito comum a utilização de estruturas de madeira no esqueleto das casas e outros tipos de revestimentos como, por exemplo, *drywall* e *gesso* para as paredes e laminados para pisos (PASZTORY, 2012).

O processo de montagem, portanto, é conhecido por *Wood Frame* – sendo que a moldura de madeira é utilizada na maioria das casas americanas, por possuírem um bom isolamento térmico, além de aumentar a agilidade na construção em relação aos modelos em alvenaria pesada (PASZTORY, 2012).

A fundação é realizada em bloco de concreto, ou seja, é a alvenaria mais pesada de uma casa, comparando-a com uma edificação no Brasil, podendo também ser aplicada na parte externa da estrutura. É muito comum em edificações para habitação o bloco ser utilizado até a altura do piso térreo, sendo que a partir daí todos os elementos estruturais são realizados em madeira, laminada e *drywall*.

No modelo de construção americana (figura 2), cada tipo de madeira é utilizado em um processo específico na estrutura de uma casa, podendo-se definir três tipos de madeiras: verde, amarela e branca. A madeira verde é utilizada na parte do alicerce, apoiada na parede de blocos estruturais, que são os elementos que receberão as maiores cargas do primeiro piso da construção. Já a madeira amarela é destinada para as paredes de carga, sendo que o quadro é montado fazendo o travamento entre as colunas de madeira verde. A madeira branca é destinada às divisórias e separações de ambiente, onde não há peso estrutural aplicado sobre ela. A (figura 2) ilustra como são construídas as casas americanas.

Figura 2. Processo construtivo nos EUA.



Fonte: SANTOSMADEIRA, [s.d.]

2.2. Modelo construtivo utilizado no continente Europeu.

No continente europeu, as matérias primas mais utilizadas na construção são pedras e tijolos, mas a madeira também é muito aplicada, sem adição de alvenaria, para formação das estruturas de sustentação. Devido a sua facilidade de manuseio e aplicação, ela é amplamente utilizada na construção civil, em países da Escandinávia e áreas montanhosas dos Alpes e dos Cárpatos, sendo que estes locais ainda preservam suas próprias tradições sociais e culturais, utilizando métodos construtivos tradicionais.

A grande maioria dos países da Europa ainda guarda a tradição das construções baseada no século 19, utilizando na construção de casas madeira, pedras, tijolos maciços e lâminas de madeira para o seu revestimento interno.

Alguns países possuem uma similaridade em seu método construtivo, como Suécia, Noruega, Finlândia, Dinamarca entre outros do norte europeu, nos quais as edificações possuem uma mesma base de materiais construtivos.

Na Alemanha, preserva-se um padrão mais tradicional que fazem leituras mais contemporâneas do seu estilo, sendo que na construção das casas

há muita utilização de vigas estruturais de madeira, com o seu posicionamento na horizontal, vertical e diagonal no exterior, preenchendo os espaços com tijolos e pedra, recursos disponíveis para a época. Nos dias atuais, entretanto, os métodos construtivos são outros, utilizando formas mais eficientes nas construções.

Segundo (FERREIRA et al., 2018), os tijolos são comumente usados na construção do sul da Europa e têm dimensões padronizadas de 290 mm x 189 mm (comprimento x altura), mas com um conjunto de possíveis dimensões de profundidade. Os valores de profundidade variam de 40 a 220 mm, visando diferentes aplicações. As perfurações internas têm uma forma quadrada de aproximadamente 27 mm x 27 mm (largura x altura).

2.3. Modelo construtivo no Brasil.

No Brasil, a situação não é diferente do sul da Europa, mas em seu método construtivo tradicional utiliza-se uma gama de materiais construtivos que se diferenciam do encontrado em alguns países de lá. Além disso, os formatos e espessuras divergem, pois seguem normas de cargas estruturais nacionais.

A seguir, serão analisados os principais sistemas construtivos, com base nas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Segundo a norma vigente NBR15270-1 (ABNT, 2017a), são elencados um conjunto de parâmetros e requisitos para tijolos e blocos estruturais, que especificam os requisitos dimensionais, propriedade físicas e mecânicas, os tipos de blocos e tijolos, podendo ser utilizados sem ou com a função estrutural. Em sua fabricação, podem apresentar diversos formatos, cavidades, furos, ranhuras e medidas, visando o seu assentamento na horizontal ou na vertical. Já a norma NBR15270-2 (ABNT, 2017b) elenca os métodos para a execução dos ensaios dos blocos e tijolos cerâmicos estruturais e de vedação.

Na figura 3, ilustra-se como é realizado o assentamento de tijolos de cerâmica para a construção de habitações populares no Brasil.

Figura 3. Construção em alvenaria no Brasil



Fonte: (Promissão, 2014)

As dimensões dos tijolos e blocos estruturais são abordadas no capítulo “Materiais e Métodos”.

É importante salientar que as ferramentas de estudos de cobertura wireless trazem em seu banco de dados uma série de valores de atenuação dos materiais construtivos mais comumente utilizados nos mercados europeus e americanos, sendo que estes dados, muitas vezes, não conferem com os materiais utilizados nas construções do país. No Brasil, são muito utilizados os blocos cerâmicos, blocos estruturais e semiestruturais e os tijolos comuns, que são largamente utilizados como principal elemento estrutural e de vedação nas construções. Além disso, seus formatos podem resultar em diversas possibilidades de espessuras das paredes, que apresentam um desafio na hora de mensurar uma determinada área de cobertura para equipamentos de rede sem fio.

Para determinar uma área de cobertura utilizando os valores existentes no *software*, o erro da atenuação pode ser inserido na planta diversas vezes (LI et al., 2013), combinando um somatório dos fatores que não correspondem aos cenários da medição. Pensando na resolução deste problema, este trabalho visa encontrar uma determinada gama de materiais e combinações possíveis,

referenciando os valores de atenuações coerentes para os sistemas construtivos utilizados no Brasil.

Diante dos diferentes métodos construtivos empregados em cada região, é necessário estudar a atenuação do sinal de rádio frequência nos diferentes materiais construtivos. Neste contexto, é necessária uma compreensão dos modelos de propagação para entender mais profundamente os fenômenos causados no sinal durante a sua transmissão em um ambiente. O estudo da atenuação é parte fundamental para a predição do mapeamento de cobertura de RSSF, *Wi-Fi* e tecnologias relacionadas.

2.4. Ferramentas de predição

Sabe-se que na propagação *indoor* a maior parte do sinal atenuado ocorre por alguns fatores, como a potência de transmissão, atenuação no espaço livre, obstáculos no ambiente. Para otimizar o processo de estruturação da cobertura *indoor* as ferramentas de predição utilizam parâmetros predefinidos (Frequência, perda no espaço livre por metro, atenuação), além disso o uso das expressões dos modelos de propagação é capaz de automatizar os números de simulações de modo a identificar qual o nível de sinal deve ser esperado em cada local da planta vetor, ilustrando-a graficamente.

Uma vez definidos os obstáculos na planta inserida no software, é possível caracterizar cada tipo de material construtivo com valores de perdas em decibel, a partir da simulação, o Indicador da Força do Sinal Recebido (RSSI) no receptor contém as informações sobre a perda gerada do número de paredes (FAFOUTIS, 2015).

Em casas inteligentes, o uso de IoT e *Wearable*, atualmente, estão em evidência, sendo muito utilizados na comunicação sem fio entre dispositivos.

Os sinais de radiofrequência no interior e no entorno das estruturas físicas podem variar muito, considerando o ponto a ponto de sua penetração, sendo que a sua energia pode chegar de diferentes direções em diferentes caminhos, devido a múltiplos caminhos de propagação da onda eletromagnética (RAPPAPORT e SANDHU, 1994). Assim, teoricamente, a atenuação produzida na

passagem completa das estruturas é algo que pode ser medido a partir dos somatórios dos sinais de múltiplos caminhos durante um intervalo de tempo (STONE, 1997).

Segundo (ZVANOVEC, PECHAC, KLEPAL; 2003), a propagação em multipercursos (múltiplas reflexões, difrações e dispersões de ondas eletromagnéticas de objetos circundantes) as distorções do sinal de rádio e as perdas de propagação são chamadas de fading.

Segundo MICHELI et al. (2015), “os valores de atenuação das paredes podem variar de 10 dB até 50 dB, dependendo do tipo de parede (concreto armado, tijolo, concreto, etc.)”.

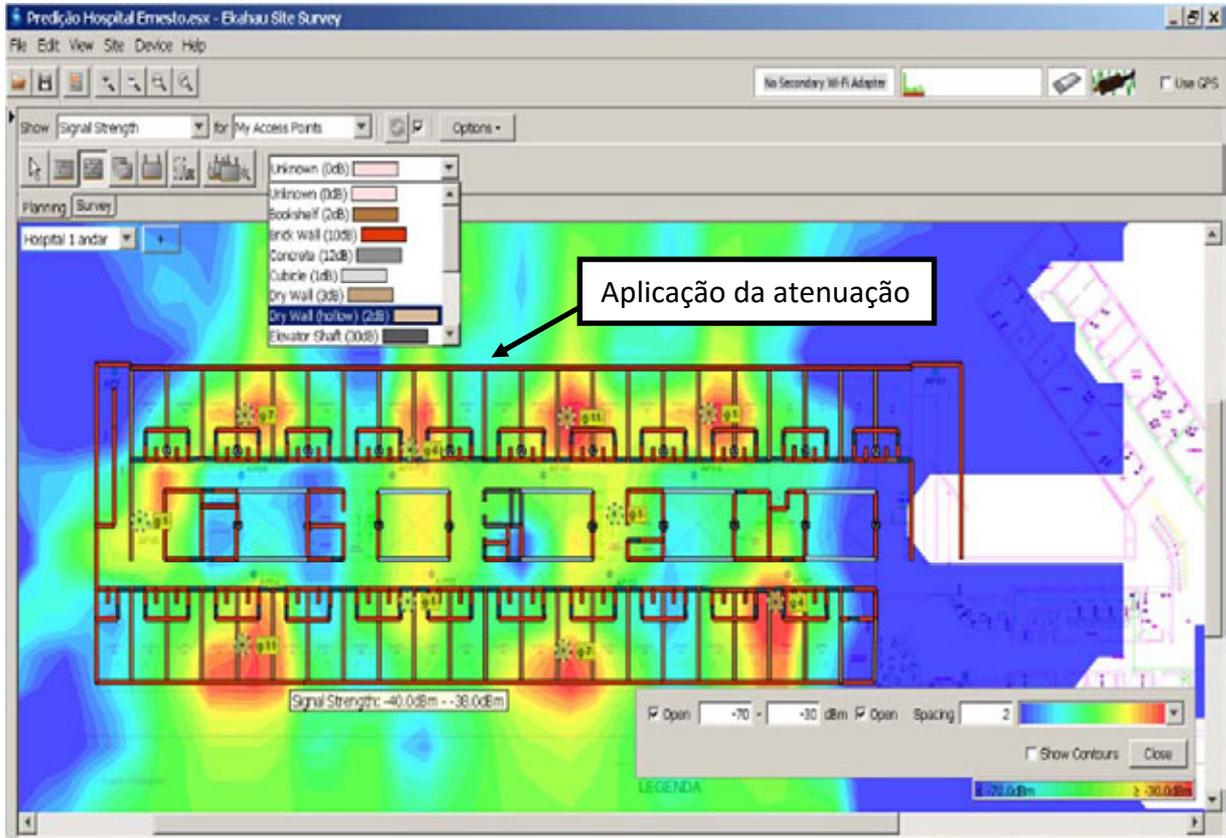
Assim, as ferramentas computacionais não apresentam modelos que descrevam a situação real, aplicando os valores relacionados aos tipos de materiais por padrões, sendo que é preciso esmiuçar uma gama de composições, avaliando as suas características de aplicações civis/industriais para alimentar uma base de dados nos softwares de predição.

Um exemplo disto foi uma predição de cobertura realizando um estudo de posicionamento de cobertura de sinal em um setor de leitos de um hospital (figura 4). Neste exemplo, o levantamento de dados utilizou somente os dados padrões do software de predição, sendo que após o estudo definiu-se algumas dezenas de antenas para todos os ambientes de leitos daquele setor. O projeto previu o investimento de muitos recursos, com toda a infraestrutura de rede estruturada, projeto, aquisição de rack e equipamentos de borda para a conexão dos pontos de acesso e na contratação de uma empresa especializada para a sua instalação. Após a implantação verificou-se recorrentes áreas de sombra e quedas constantes da cobertura de sinal em diversos andares, impossibilitando o principal recurso a ser utilizado, que se tratava de ligações telefônicas a custo zero utilizando a rede wireless. Na análise do modelo identificou-se que atenuações incorretas, utilizadas para as paredes estruturais do prédio, levaram a erros quantitativos e na topologia de distribuição de células dos transmissores.

O erro no processo de tomada de decisão, descrito no parágrafo anterior, poderia ser evitado se fossem utilizados os valores corretos das perdas aplicadas

aos materiais dos leitos e seus respectivos somatórios no ambiente. A figura 4 mostra a planta do local e a predição feita.

Figura 4. Predição de cobertura em 2.4GHz.



Fonte: Elaboração própria.

Em predições para cobertura DECT - *Digital Enhanced Cordless Telecommunications*, que são interfaces de comunicação de telefonia baseados em microcélulas de GSM (PHONGPHANPHANEE, 1999), podem ser implementadas de duas maneiras, com a sincronização via LAN ou AIR (“Over-the-air”) (UNIFY, 2015). A sincronização LAN usa a rede cabeada para se comunicar com o servidor, sendo mais onerosa, necessitando projeto de rede e infraestrutura a ser disponibilizada; sendo que em relação à RF será necessário avaliar as obstruções na planta, para posicionar cada célula. Já na sincronização via AIR, cada base DECT conecta-se com a antena vizinha, determinando o *clock* de sincronismo, sendo a implantação menos onerosa, devido a necessidade de usar apenas a alimentação dos pontos de rádio base. Neste tipo de projeto é crucial um posicionamento de rádios com células bem definidas, além de ser necessário

conhecer os detalhes dos materiais utilizados na planta, para determinar onde ficará cada antena.

Para uma sincronização precisa e estável, a intensidade mínima do sinal deve ser de - 75 dBm, tendo como intensidade mínima teórica para sincronização - 85 dBm (UNIFY, 2015).

O sistema DECT IP deve estar perfeitamente sincronizado como pré-requisito para execução do *handoff*, ou seja, a troca de célula de comunicação sem perda de conexão com a estação base (STEELE et al., 1995). Se todas as estações bases estiverem sincronizadas, elas combinam-se formando uma grande área de cobertura sem desconexões, ou seja, sem queda na transferência de um móvel de uma base a outra (UNIFY, 2015).

Além disso, toda vez que uma base perde a sincronização ela fará o processo de re-sincronização e durante esse tempo não é possível estabelecer qualquer chamada nesta base, ou seja, a mesma fica indisponível aos usuários.

Para elaborar uma rede DECT há duas formas para executar o mapeamento, a saber: pesquisa (survey) assistida com kit de aparelhos da marca do equipamento ou pesquisa (survey) com analisadores de rádio frequência, coletando um sinal emulado na frequência de operação das antenas bases. Neste último procedimento, é preciso percorrer todo o ambiente coletando o RSSI (*received signal strength indicator*) do sinal, plotando a intensidade do sinal na planta baixa, sendo que, posteriormente, deverão ser utilizadas estas informações para calibrar um *software* de predição, inserindo os valores de atenuações das composições encontradas nos ambientes. A perda por absorção nos materiais é um dos parâmetros que são replicados nas demais estruturas do layout e servem de base para os cálculos de irradiação do sinal nos modelos matemáticos.

A realização de uma predição sem os valores corretos de atenuações dos materiais é algo que pode gerar impactos em um projeto de qualquer porte, sendo que a estimativa incorreta pode levar a projetos incompatíveis com a realidade de um gestor de tecnologia de informação de uma indústria, gerando quantitativos muito elevados e até mesmo ao cancelamento de investimentos.

2.5. Regulamentação ANATEL sobre as frequências

A emissão de potência de radiofrequência está baseada nas normas vigentes fixadas pela ANATEL - Agência Nacional de Telecomunicações, a saber (ANATEL, 2017):

“Resolução 680 de 27 de julho de 2017, aprova o Regulamento sobre Equipamentos de Radiocomunicação de Radiação Restrita e altera o Regulamento dos Serviços de Telecomunicações, o Regulamento de Gestão da Qualidade do Serviço de Comunicação Multimídia, o Regulamento do Serviço de Comunicação Multimídia e o Regulamento do Serviço Limitado Privado.”

A norma ANATEL 680 especifica que cada faixa de frequência utilizada possui um valor limite de emissão de potência em intensidade de campo. A tabela 1 elenca todas as faixas de frequência de operação, sendo que conforme a resolução vigente (ANATEL, 2018):

“Os limites de intensidade de campo média, medida a uma distância de 3 metros, de um equipamento de radiação restrita operando nas faixas 902-907,5 MHz, 915-928 MHz, 2.400-2.483,5 MHz, 5.725-5.875 MHz e 24,00-24,25 GHz não devem exceder ao especificado. O pico de intensidade de campo de qualquer emissão não deve exceder o valor médio especificado por mais de 20 dB. As emissões fora das faixas de frequências especificadas, exceto harmônicos, devem estar atenuadas por, no mínimo, 50 dB do nível da fundamental ou atender aos limites gerais de emissão na tabela 1”.

Tabela 1. Limites Gerais de Emissão

Faixa de radiofrequência (MHz, onde não especificado)	Intensidade de campo (microvolt por metro)	Distância da Medida (metros)
9-490 kHz	$2.400/f(\text{kHz})$	300
490-1705 kHz	$24.000/f(\text{kHz})$	30
1,705-30	30	30
30-88	100	3
88-216	150	3
216-960	200	3
Acima de 960	500	3

Fonte: Resolução Nº 680 ANATEL.

- Sobre a faixa de 900 MHz, sistemas que utilizam salto de Frequência operando dentro da faixa de 915-928 MHz, a potência máxima de trabalho não deverá ultrapassar 1 Watt para sistemas de no mínimo 35 canais, já na potência de

0,25 Watt para sistemas que operem em menos de 35 canais de salto de frequência.

- Sobre a faixa de 2.400-2.483,5 MHz, permite o uso de tecnologia de espalhamento espectral ou tecnologia de multiplexação Ortogonal por Divisão de Frequência – OFDM, permite também a operação em sistemas que utilizem canais com saltos de frequências de 25 KHz ou equivalente a dois terços da largura da faixa e saída de potência menor que 125 mW.

- Sobre a faixa de frequência de 1910-1920 MHz para qual não é definida uma canalização, ou seja, os equipamentos destinados a sistema de ramal sem fio, mesmo assim não podem operar em canalização que excedam o espaçamento entre portadoras superior à de 2 MHz. A potência de trabalho na saída do transmissor não deve ultrapassar a 250 mW.

- Sobre a faixa de 5.150- 5.350 MHz, 5.470-5.725 MHz destinadas a sistemas de acesso sem fio em banda larga para redes locais, devem operar no máximo 250 mW na saída do transmissor e possuir uma potência EIRP que não passe de 1 Watt.

- Sobre a faixa de 5.725-5.850 MHz, para sistema ponto a ponto a potência de saída do transmissor não deve ser superior a 1Watt.

Já a Resolução 700, de 28 de setembro de 2018, tem por objetivo estabelecer limites para a exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos, na faixa de radiofrequências entre 9 kHz e 300 GHz. Este regulamento se aplica a todos que utilizem estações transmissoras que exponham seres humanos a campos elétricos, magnéticos ou eletromagnéticos na faixa de radiofrequências indicada neste trabalho (ANATEL, 2018).

A resolução da Anatel elenca alguns parâmetros para realizar uma medição sobre equipamentos com espalhamento espectral ou outras técnicas de modulação nas faixas de frequências: 902-907,5 MHz, 915-928 MHz, 2.400-2.483,5 MHz e 5.725-5.850 MHz. Conforme descrito no documento, o analisador de espectro deve ser configurado seguindo os seguintes itens:

- Frequência central = Canal a ser medido
- FREQUENCY SPAN = Suficiente para a visualização do canal
- RBW = 100 kHz
- VBW = 300 kHz
- Display = Max hold
- Sweep Time = Auto

- Modo de detecção = Positive peak

O procedimento também informa como deve ser coletado o pico de emissão, utilizando a função *peak search* até encontrar o nível mais alto no display do instrumental.

2.6. Câmara Semi-Anecoica

Conforme (WILLIAMS, 2001) todos os ensaios de EMI/EMC (*Electromagnetic interference* (EMI) *and electromagnetic compatibility* (EMC)) devem ser realizados em uma câmara Semi-Anecóica, na qual, geralmente, o piso é construído em concreto; sendo teoricamente um ambiente livre de interferência de ondas eletromagnéticas externas, muito similar a uma gaiola de *Faraday* propriamente dita. As ondas eletromagnéticas em seu interior são anuladas por absorvedores construídos de materiais condutores, impossibilitando a reflexão dos sinais de radiofrequência.

A figura 5 ilustra o método de medir a atenuação do local, que é a perda de inserção medida entre os terminais de duas antenas em um local de teste, sendo que uma antena é varrida em uma faixa de altura especificada. Conforme a tabela 2, estabelecem-se as distancias e ambas as antenas têm a mesma polarização. O valor coletado da atenuação é dado em dB para as faixas de frequências das medidas. Sendo assim, os valores são subtraídos dos ganhos da transmissão e recepção, a fim de apresentar o desempenho do ambiente, que não possuem nenhuma relação com as antenas ou instrumentação no teste de validação.

As medições de Atenuação de Site Normalizado (NSA- *Normalized Site Attenuation*), segundo Williams (2001):

“são realizadas para polarizações horizontais e verticais, com a antena de transmissão posicionada a uma altura de 1m (para antenas de banda larga) e a antena de recepção varrida pela varredura de altura apropriada”.

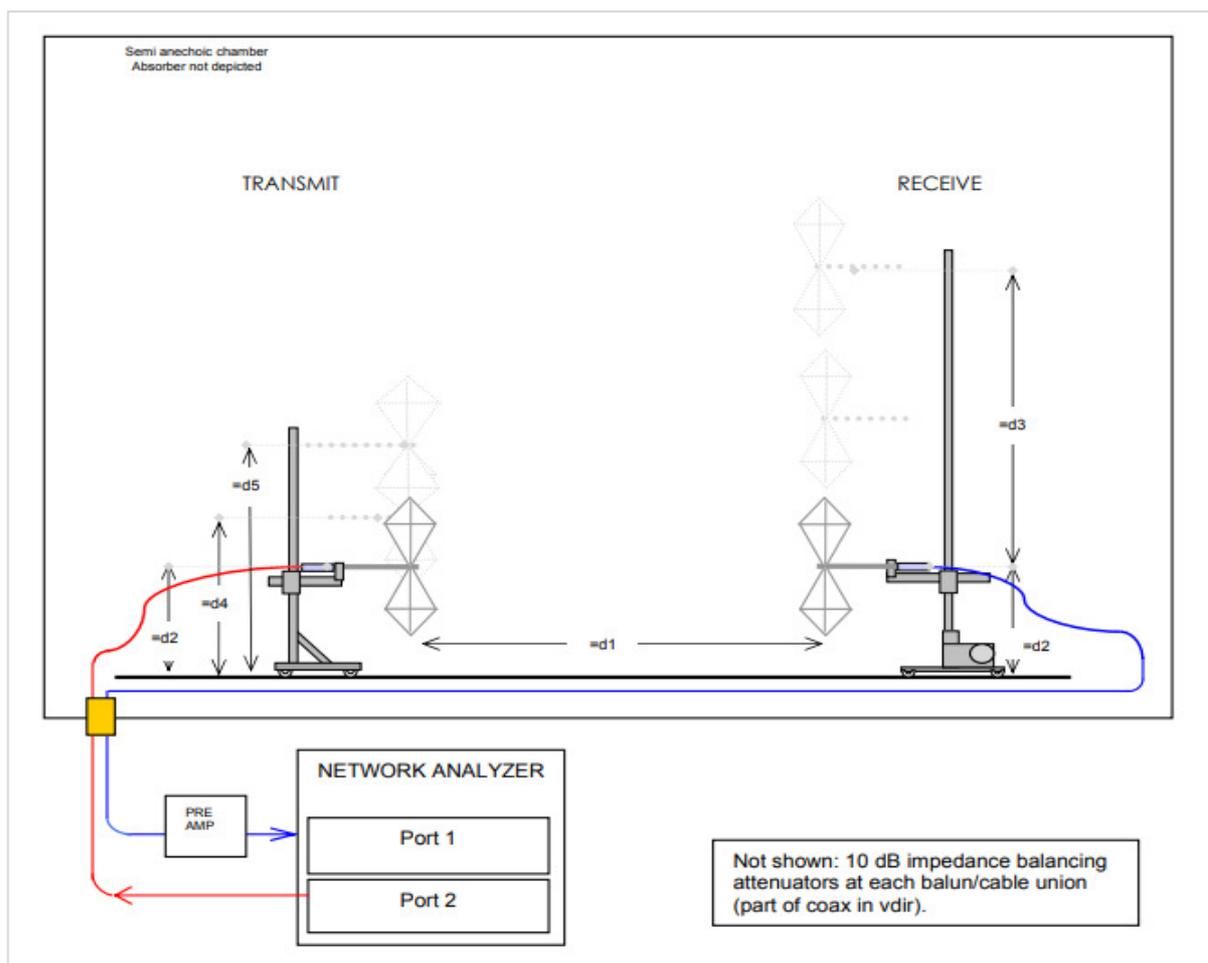
Os padrões CISPR 16-1 especificam que uma varredura na altura de 1 a 4 m para ambientes de teste de 3 e 10 m. A variação da altura da antena no teste

é para garantir que os nulos causados pela adição destrutiva das ondas refletidas direta e terrestre sejam calculadas e removidos da medição (CISPR 16-1, 2003).

A varredura da altura não se destina a medir ou permitir variações relacionadas à elevação no sinal emitido diretamente da fonte, seja na medição da NSA ou em um teste de emissões irradiadas.

Segundo Tuttle (2012) A qualidade de uma câmara semi-aneecóica para medições de emissão de ruído de rádio pode ser deduzida da diferença entre a atenuação em um Local de Teste de Área Aberta (OATS) em ambiente NSA e a mesma medição na câmara de teste (Figura 5). O padrão ANSI C63-41 autoriza um desvio máximo de +/- 4 dB. Técnicas de modelagem numérica podem ser usadas para avaliar e otimizar o desempenho da câmara.

Figura 5. Configuração padrão do equipamento de teste da NSA: Vista lateral.



Fonte: TUTTLE, 2012.

A tabela 2 relaciona as configurações necessárias para as modificações de cada ensaio de medida ilustrado na figura 5. Vale ressaltar que a figura 5 é o diagrama de certificação de um ambiente NSA, que serve de fundamento para o método de coleta de dados.

Tabela 2. Configurações do *setup* da figura 5.

Valor	Distância	Posição	Polarização
d1 =	Limite da área	Antena para Antena	Horizontal-Horizontal /Vertical - Vertical
d2 =	1m	Fixado no plano terra	Horizontal-Horizontal /Vertical-Vertical
d3 =	1m – 2.2m	Faixa de escaneamento	Horizontal-Horizontal /Vertical-Vertical
d4 =	1.5m	Fixado no plano terra	Vertical-Vertical
d5 =	2m	Fixado no plano terra	Horizontal-Horizontal

Fonte: Alterado de TUTTLE, 2012.

Entretanto, com um analisador de espectro calibrado e uma antena razoavelmente bem construída nas frequências de trabalho do *setup*, será necessário calibrar com uma fonte conhecida, tornando possível calcular a potência transmitida a partir da intensidade de campo medida. Desse modo, entende-se que esta etapa é que permitirá a verificação dos resultados obtidos com a aplicação do método utilizado nesta pesquisa.

2.7. Principais trabalhos relacionados a medidas de atenuação em materiais construtivos.

Este tópico apresenta os trabalhos que estão relacionados ao tema de atenuação do sinal de rádio frequência em ambientes *indoor*, sendo que abordam diferentes métodos de coletas de dados.

Ferreira et al. (2018), apresentam uma abordagem para o sinal de radiofrequência em paredes estruturais, com o foco na arquitetura construtiva do sul da Europa, onde foi demonstrado que alguns materiais possuem resultados significativos na propagação sem fio. O foco dado no artigo foi a FSS. Os autores esclarecem que vários modelos têm sido propostos ao longo dos anos para melhorar os fenômenos de propagação. Sobre os materiais estudados, como os tijolos de barro encontrado no Sul em relação aos países do centro e do Norte,

podem ter diferentes requisitos construtivos, com um impacto substancial na propagação sem fio, promovendo comportamento não linear em que a resposta de frequência apresenta nulos de transmissão em várias faixas de frequência. O tipo de material construtivo utilizado em tais interfaces é a principal característica que pode ditar o comportamento geral da transparência de RF.

É importante dizer que os autores fazem uma relação na perda por penetração, com o foco especial em paredes de tijolos perfurados que, na sua opinião, isso está faltando na literatura científica. Os autores concluem que as paredes de tijolos perfurados possuem valores de perda por penetrações significativas em todas as faixas de frequência estudadas, sendo que os arranjos em multicamadas do material produzem perdas de 20 a 30 dB, sendo que camadas de construção composta por madeira, gesso e tijolos de barros mais finos apresentaram valores menores de perda de atenuação.

Em Micheli et al. (2015), foi realizado um método de coleta de atenuação para a faixa de frequência de 700 MHz – 5 GHz onde a atenuação da parede do edifício e as perdas internas afetam fortemente o nível dos campos eletromagnéticos. Nesse estudo, não foram realizados o detalhamento sobre a atenuação eletromagnética de paredes construídas com diferentes materiais e técnicas de alvenaria, ou seja, o autor dá ênfase aos muros de edifícios construídos a muitos séculos em Roma na Itália, utilizando de composição o concreto, que representam a maioria dos edifícios urbanos na Europa. Para a coleta de dados utilizou da distância fixa entre a antena TX e a RX, variando a profundidade de inserção entre 5 cm a cada vez na estrutura. O autor desconsiderou os efeitos de múltiplos caminhos do sinal propagado e a difração, coletando a medida a partir de um instante de tempo, que a partir disso evidencia quais respostas são o caminho penetrante e o caminho disperso; mostrando seus atrasos de tempo e verificando se o caminho penetrante é corretamente extraído e a atenuação medida está retornando à atenuação apropriadamente. Devido as estruturas altamente espessas do material estudado, os valores de atenuação chegaram a 85-90 dB, enquanto para estruturas de concreto armado de edifícios ficaram na ordem de 40 dB de atenuação.

No trabalho de Micheli et al. (2016) a proposta analisa diferentes tipos de edifícios, desde ruínas históricas do Império Romano até os modernos edifícios

de concreto armado em aço e vidro. No estudo, foi mostrado os valores de atenuações até a ordem de 100 dB, sendo que os muros de construções mais antigas e as estruturas de aço e vidro possuem maiores capacidade de bloqueios do sinal. A sua análise dá ênfase na eficácia da blindagem eletromagnética das paredes e não da estrutura inteira da construção. Para a medição foi utilizado o processo conhecido como frequência controlada pelo tempo onde, segundo o autor, há uma melhoria da qualidade da resposta devido a eliminação dos efeitos de reflexões espúrias. Ao todo, foram realizadas 34 medidas, que segundo o artigo destaca cobertura interna mais homogênea a 1 GHz em relação a 6 GHz, sendo que as medidas atingiram valores máximos em torno de 35 dB; enquanto obteve-se valores mínimos em torno de 2 dB para as paredes internas do tipo *drywall*.

Em Vo Dai et al. (2018) foi desenvolvida uma proposta de construir uma câmara anecóica de baixo custo, com as características retangulares para o uso educacional. Na descrição do autor, as câmaras anecóicas são ambientes isolados e controlados que permitem minimizar a interferência eletromagnética, sendo utilizados para ensaios e testes de dispositivos RF. As primeiras câmaras testadas ofereciam um coeficiente de reflexão de -20 dB em 2.4-10 GHz, mas com o desenvolvimento de absorvedores mais eficazes o coeficiente de reflexão saltou para valores superiores a -60 dB. No artigo, a proposta é validada através de medições de perda de retorno e perda de inserção. Utilizou-se o transmissor com potência de saída de 0 dBm, que é um parâmetro relevante, sendo que o sinal eletromagnético penetra em um meio com perda, diminui e fica atenuado, mas que depende da permissividade relativa e da condutividade do meio. Foram utilizadas equações para medir a distância das antenas no *setup*, o campo próximo e campo distante e suas influências na medida. Segundo sua pesquisa, uma desvantagem crucial das câmaras retangulares é em baixa frequência, ou seja, abaixo de 1 GHz, devido aos grandes ângulos das paredes, teto e piso.

A proposta de Li et al. (2013) elenca os fatores locais, materiais e espessuras das paredes em plantas arquitetônicas, a fim de calcular a localização e as espessuras das paredes. Trata o modelo de predição de canal como um importante método para auxiliar o projetista, visando otimizar os sistemas de transmissão. Esse trabalho desenvolve um modelo de propagação de perda de trajetória para *Multi-Walls* (descrito no item 3 deste trabalho), com maior precisão

se comparado aos modelos conhecidos de perda por trajetória em ambientes internos, utilizando os métodos empíricos. Utilizou em seu modelo a perda por atenuação em três tipos de paredes: parede leve, parede pesada e parede de metal. O autor conclui que o modelo proposto é robusto ao ruído nas imagens em plantas baixas, o que proporciona uma vantagem potencial para o modelo proposto na previsão de perda de trajetória interna.

Este trabalho, difere-se das outras referências na utilização do método de blindagem do sinal eletromagnético, uma vez que está sendo proposto uma câmara de medição de sinal, que permita a passagem do sinal da antena TX em direção a parede na parte frontal da caixa, mantendo isolada a entrada por outras direções. No artigo de (Ferreira et al., 2018) ele utilizou uma blindagem extra em formato de painel, porém não permite isolar a antena receptora dos efeitos de múltiplos caminhos da onda eletromagnética.

A proposta deste trabalho apresenta uma semelhança de dimensão da câmara de coleta de sinal entre o realizado por (Vo Dai et al., 2018) que utiliza placas absorvedores de sinal, no entanto difere-se na utilização das antenas e aplicabilidade da estrutura.

Na referência (Micheli et al. 2015), é abordado a coleta de atenuação de paredes antigas com grandes espessuras de vedação, é evidente uma atenuação elevada sobre as determinadas espessuras e frequências, sendo importante para comparar com os resultados obtidos.

As características apresentadas nas referências ajudaram na escolha dos equipamentos e antenas, além disso contribuíram para definir os parâmetros utilizados na elaboração do *setup*.

3. MODELOS DE PROPAGAÇÃO.

Os modelos de propagação são expressões matemáticas fundamentais utilizados para descrever os efeitos e comportamentos do sinal eletromagnéticos em predições de área de cobertura de rádio. Neste capítulo, descreve-se os principais modelos utilizados e os fenômenos que ocorrem com o sinal de rádio frequência ao passar por estruturas no ambiente.

3.1. Atenuação

Atenuação do sinal pode afetar diretamente o desempenho de uma rede sem fio, ocasionando a redução do sinal de rádio frequência no ambiente, levando a queda de *throughput*, aumento de taxas de erros na comunicação entre as antenas do transmissor e receptor. Diante disso, este fenômeno que o sinal sofre em um ambiente *indoor* é difícil de prever, uma vez que existem uma quantidade de variações de material que somam aos obstáculos que o sinal precisa percorrer durante o seu caminho, uma vez que o caminho entre o receptor e o emissor pode estar bloqueado por paredes, tetos e obstáculos. A própria planta adotada e o sistema de construção do edifício, influenciam a maneira como o sinal se propaga no cenário e para outros cenários adjacentes.

Segundo PERES (2010), na propagação dos sinais de RF pode ocorrer: a) a atenuação de um sinal em transmissão; b) atenuação dos sinais pode ocorrer a distribuição do sinal no espaço durante a transmissão; e c) a capacidade da antena de recepção de captar o sinal. Salienta que as propriedades dos materiais têm um efeito dominante na reflexão e transmissão de ondas de rádio, através de materiais de construção e na absorção de energia de radiação nesses materiais.

Reinfsneider descreveu os resultados de atenuações obtidos para um conjunto de materiais, como: vidro, madeira, parede de tijolos, porta de madeira e *drywall*. Na tabela 3, listam-se os vários materiais medidos (Reinfsneider, 2003 apud Dobkin, 2005).

Tabela 3. Valores de atenuações para vários sistemas de construção internos.

Obstáculo	900 MHz	1.8 GHz	2.4 GHz
Parede interna (<i>drywall</i>)	2 dB	2,5 dB	3 dB
Tijolo, concreto, blocos de concreto	13 dB	14 dB	15 dB
Parede de divisória	1 dB	1,5 dB	2 dB
Porta de Madeira	2 dB	2,5 dB	3 dB
Janela de vidro	2 dB	2,5 dB	3 dB
Janela de vidro com isolamento	10 dB	10 dB	10 dB

Fonte: Adaptado de Reifsneider (2003 apud Dobkin 2005).

DOBKIN (2005), após algumas medidas da absorção de uma parede de concreto armado típica com 20 cm de espessura, obteve atenuação de 5–6 dB a 5,3 GHz.

Assim, pode-se ver que várias fontes relatam resultados consistentes para materiais comuns, mas relatam grandes discrepâncias no comportamento relatado em paredes de concreto.

Em RUDD et al. (2014), a atenuação em decibéis é proporcional à profundidade do material através do qual o sinal se propaga, enquanto a atenuação total dependerá do ângulo de incidência do fluxo de radiação no edifício.

O trabalho de TORNEVIK (1993), elenca uma série de medidas em 900 MHz. O autor percebeu que a diferença no fator de atenuação da parede está relacionada com a diferença na composição das paredes internas. O menor fator de atenuação da parede foi obtido em escritórios onde a maioria das paredes era feitas de gesso acartonado, enquanto o maior fator foi encontrado para a garagem, onde todas as paredes foram construídas em concreto armado.

Segundo a fabricante AVAYA (s.d.), além da perda de caminho de espaço livre mencionada anteriormente, os sinais de RF serão atenuados quando passarem por objetos como folhagem, paredes e edifícios. O nível de atenuação de sinal nesses casos pode aumentar a perda e reduzir o alcance das comunicações em uma quantidade adicional de 10 a 20 dB, ou mais.

Segundo DOBKIN (2005), as atenuações encontradas por outros autores divergem entre si. Para contornar este problema, o autor classifica a

atenuação dos materiais utilizados na construção em espessuras tipicamente utilizadas neste meio, que podem ser classificadas da seguinte forma:

- Atenuação grande: concreto espesso, alvenaria ou madeira maciça: 10-20dB / parede.
- Atenuação moderada: paredes de tijolo de camada única, alvenaria fina, painéis de madeira, paredes de estuque: 5-10 dB / parede.
- Atenuação baixa: madeira compensada, vidro, portas de madeira, paredes de cubículos, painéis de parede seca: menos de 5dB / obstáculo.

3.2. Recomendação ITU-R P.2040

A recomendação ITU-R P.2040 (2013) descreve os princípios fundamentais sobre a interação das ondas de rádio nos materiais construtivos. A sua base teórica utiliza vários parâmetros para o uso de expressões básicas nos cálculos de reflexão e transmissão, onde os compostos são únicos ou em formações construtivas únicas e múltiplas.

Segundo a recomendação ITU-R P.2040 (2013), a abordagem relaciona o uso de fórmulas simples que são dependentes da frequência de trabalho, para a permissividade e condutividade dos materiais. A partir da adaptação da curva de várias medições ao conjunto de fórmulas contida nessa recomendação, sendo aplicáveis a faixa de 1 a 100 GHz.

Um outro fator importante é que a perda do sinal depende da frequência de uso e do ângulo de incidência do sinal de rádio sobre o material (RUDD et al., 2014).

3.3. Propriedade elétrica dos materiais

A principal definição em discussão na recomendação da ITU-R (P.2040) são as quantidades básicas relacionadas às propriedades elétricas dos materiais. As grandezas fundamentais são a permissividade elétrica, ϵ , e a condutividade do composto, σ .

Os materiais de construção são não magnéticos e não ionizados. Isso significa que é preciso considerar, apenas, as propriedades dielétricas dos materiais de construção. A maioria dos materiais de construção se comporta como dielétricos com perdas. Mesmo os metais podem ser caracterizados dessa maneira, embora as perdas de RF através do metal sejam muito altas (RUDD et al., 2014).

3.4. Modelo de Propagação no Espaço Livre.

O modelo de propagação no espaço livre consiste num modelo no qual o sinal se propaga de forma radial, sem refletir em obstáculos durante o seu trajeto. Essa abordagem não utiliza elementos de obstrução durante o caminho da onda (ARTEMENKO et al., 2016).

Neste modelo, a potência recebida é uma função da potência transmitida, ganho da antena e distância entre um transmissor e um receptor. A ideia básica é que a potência recebida diminui com o quadrado da distância entre o transmissor e o receptor, estando sujeita à suposição de que existe um único caminho entre o transmissor e o receptor.

A potência do sinal recebido em espaço livre, a certa distância do transmissor, é dada por:

$$Pr(d) = PtGtGr \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2; \quad (\text{eq.1})$$

Sendo:

Pt é a potência do sinal transmitido,

Pr é a potência do sinal recebido,

Gt é o ganho da antena do transmissor,

Gr é o ganho da antena do receptor,

λ é o comprimento de onda.

É comum selecionar $Gt = Gr = 1$.

A perda do sinal pode ser expressa em dBm, como:

$$L = 32.44 + 20\log_{10}d + 20\log_{10}f \text{ [dBm]} \quad (\text{eq. 2})$$

Sendo:

L = a perda em dB;

d = a distância em Km;

f = a frequência de transmissão em MHz;

3.5. Modelo de Propagação One Slope

O modelo *One Slope* considera, além da perda do nível do sinal em decibéis ocorrido em sua trajetória, as distâncias logarítmicas do percurso. Segundo (COST 231,1999), (SANCHES, 2005), o modelo é representado pela equação:

$$L = L(d_0) + 10 n \log(d) \quad (\text{eq. 3})$$

Onde:

L - é perda ocorrida na propagação em função da distância em (dB);

d - é a distância entre o emissor e o receptor dado em (m);

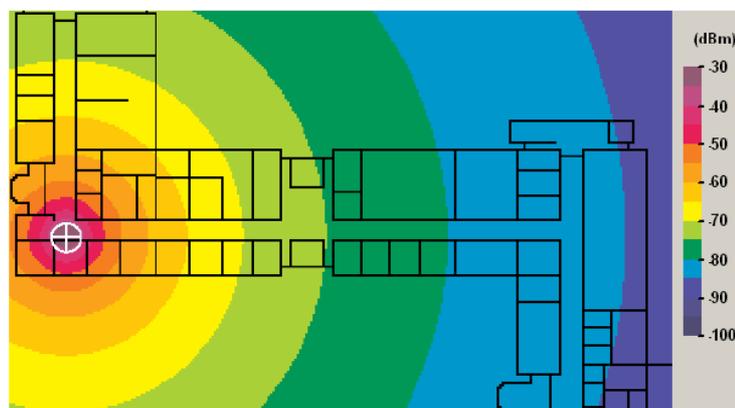
$L(d_0)$ - é a perda de propagação de referência a um metro de distância em (dB), calculada por:

$$L(d_0) = 20 \log_{10} \frac{4\pi}{\lambda/[m]} \quad (\text{eq. 4})$$

n - gradiente de potência-distância;

O parâmetro utilizado neste modelo é o valor da distância entre a geração do sinal e a recepção. Um outro fator que deve ser levado em consideração é o gradiente n expoente de perda de percurso, que varia no ambiente. Segundo ZVANOVEC, PECHAC, KLEPAL (2003): “O parâmetro diferente de n é usado para corredores e escritórios, a um valor n médio entre 1,4 e 4,0 pode ser usado como uma compensação, então a previsão será válida para todo o piso, mas com uma menor precisão”. Na figura 6, o valor de $n = 2$, que corresponde à propagação em espaço livre.

Figura 6. Exemplo de propagação ONE SLOPE.



Fonte: (ZVANOVEC, PECHAC, KLEPAL; 2003).

3.6. Modelo De Propagação Multi – Wall

O modelo de propagação *multi-wall* trata a atenuação no espaço livre, somadas a perda de trajeto entre um transmissor e receptor no ambiente *indoor*. Considera-se que há outros fatores que afetam a propagação do sinal de rádio, que é o modelo de múltiplas paredes (SANCHES, 2005). Este modelo, *multi-wall*, acrescenta os valores introduzindo a quantidade de paredes e número de pisos no sistema, sendo a atenuação do sinal representado na figura 7. Já a sua representação matemática é dada por:

$$L = L_{d0} + 10 n \log d + K F_1 + \sum_{i=1}^M A_i \quad (\text{eq. 5})$$

Onde:

L - é perda por propagação em função da distância, dB;

d - é a distância do transmissor para o receptor em metros;

L_{d0} - é a perda da propagação do sinal a um metro de distância em dB;

n - gradiente potência distância;

K - Número de pisos “pavimentos”

F_1 - fator de atenuação entre pisos adjacentes dB (FAF-Floor Attenuation Factor);

M - Número de paredes entre transmissor e receptor;

A_i - fator de atenuação nas paredes do tipo i dB.

Segundo SANCHES (2005) na equação 5 utiliza-se a variável n que é o gradiente de potência-distância, mas salienta que valores de atenuação são mais próximos da realidade se utilizada a segunda equação do modelo *multi-wall*, dada por:

$$L = L_{fs}(d) + \sum_{i=1}^N K_{wi} L_{wi} + K_f L_f \quad (\text{eq. 6})$$

L - é a perda por propagação em função da distância, dB;

$L_{fs}(d)$ - é a perda por espaço livre entre transmissor e receptor na distância “ d ” em dB;

K_{wi} - número de paredes entre transmissor e receptor do tipo i ;

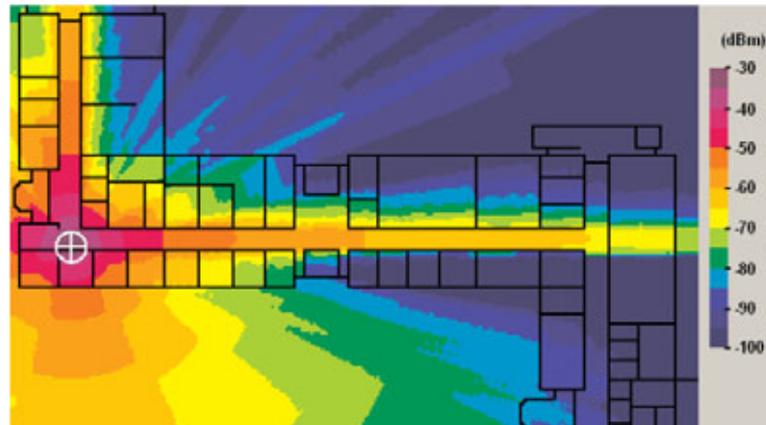
L_{wi} - fator de atenuação nas paredes do tipo i dB;

N - Número de tipos de parede;

K_f - é o número de pisos entre transmissor e receptor;

L_f - fator de atenuação entre pisos adjacentes dB (FAF - Floor Attenuation Factor).

Figura 7. Representação da propagação do modelo Mult-Wall



Fonte: (ZVANOVEC, PECHAC, KLEPAL; 2003).

O *Floor Attenuation Factor (FAF)*, é um valor empírico encontrado a partir de numerosos testes, podendo ser empregado nas equações conforme as frequências apresentadas na tabela 3.

Tabela 4. Fator de atenuação de piso.

FAF (Fator de atenuação de piso)	
Frequencia – MHz	dB
900	10
1900	18
2400	21
5300	26

Fonte: SANCHES, 2005.

Nota-se, também, que os valores de FAF dependem de medidas reais para o conhecimento dos valores, pois a formação das lajes de edifício para edifício pode variar em relação a composição do material e na sua densidade.

3.7. Modelo ITU-R P.1238

A recomendação ITU-R P.1238 define vários parâmetros de perda provocada pela propagação do sinal de rádio frequência em ambientes *indoor*. O uso deste modelo de perda de transmissão em ambientes *indoor* pressupõe que a estação transmissora e o ponto receptor estejam localizados dentro do mesmo

edifício. A perda por trajeto entre a estação base para o ponto móvel, poderá ser estimada com modelos gerais de sites ou sites específicos (ITU-R P.1238-9).

Outro fator importante desta recomendação é o aproveitamento da frequência utilizada dentre as diferentes áreas dos mesmos ambientes construtivos.

Devido à complexidade dos fatores que podem influenciar no sistema de propagação de rádio em ambientes indoor, a ITU-R elenca a necessidade de um modelo que represente mais características do ambiente, como por ex. geometria, mobília, padrões de uso, etc. Sua equação é representada por:

$$L_{total} = L(d_o) + N \log_{10} \frac{d}{d_o} + L_f(n) \text{ dB} \quad (\text{eq. 7})$$

Onde:

N: coeficiente de perda de potência da distância;

f: frequência (MHz);

d: distância de separação (m) entre a estação base e o terminal portátil (onde $d > 1$ m);

d_o: distância de referência (m);

L(d_o): perda de trajeto no *d_o* (dB), por uma distância de referência *d_o* a 1 m, e assumindo que o espaço livre propagação $L(d_o) = 20 \log_{10} f - 28$ onde *f* é em MHz.

L_f: fator de perda de penetração no piso (dB).

n: número de andares entre a estação base e o terminal portátil ($n \geq 0$), $L_f = 0$ dB para $n = 0$.

Este modelo pode ser utilizado em duas situações: com LOS - linha de visada direta entre as antenas e NLOS - sem linha de visada direta. Salienta-se que nesta dissertação irá ser medida a atenuação do sinal no material, então será utilizada a segunda opção NLOS, com o valor de *n* para uma obstrução entre o transmissor e o receptor. As tabelas 5 e 6 apresentam os coeficientes e fatores de perdas correspondentes.

Tabela 5. Coeficientes de perda de potência N para cálculo de perda de transmissão interna.

Frequência (GHz)	Residencial	Escritórios	Comercial
0.8	–	22.5	–
0.9	–	33	20
1.9	28	30	22
2.4	28	30	–
5.2	30 28	31	–
5.8	–	24	–

Fonte: (Adaptado de ITU-R P1238-9)

Tabela 6. Fatores de perda de penetração de piso, L_f (dB) com n sendo o número de andares penetrados, para cálculos de perdas internas ($n \geq 1$).

Frequência (GHz)	Residencial	Escritórios	Comercial
0.9	–	9 (1 piso) 19 (2 pisos) 24 (3 pisos)	–
1.8-2	$4n$	$15 + 4(n - 1)$	$6 + 3(n - 1)$
2.4	$10^{(1)}$ (apartamento) 5 (casa)	14	–
3.5	–	18 (1 piso) 26 (2 pisos)	–
5.2	$13^{(1)}$ (apartamento) $7^{(2)}$ (casa)	16 (1 piso)	–
5.8	–	22 (1 piso) 28 (2 pisos)	–

Fonte: ITU-R P1238-9

- (1) Por parede de concreto
(2) Revestimento de madeira.

3.8. Difração, Reflexão, dispersão e absorção

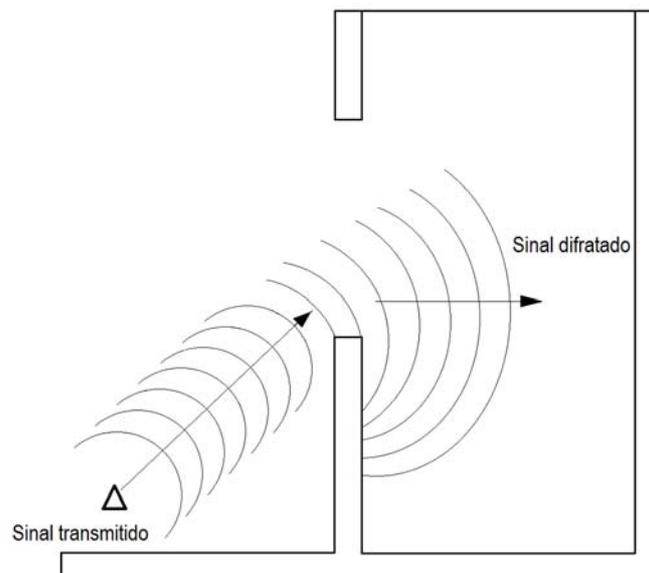
Além dos fatores causados pela degradação do sinal no espaço livre, o sinal de rádio frequência poderá sofrer variações em sua intensidade de sinal ao incidir sobre o material.

Os fenômenos a seguir descrevem os efeitos causados sobre a onda de rádio ao incidir sobre uma superfície, os efeitos são classificados em:

3.8.1. Difração

A difração é o fenômeno que a onda de rádio ao incidir sobre a borda ou orifício de uma superfície realiza o encurvamento da onda, distorcendo sua irradiação. Esta flexão dos sinais causa um espalhamento, propriedade dominante na propagação dos sinais de rádios até alcançar um receptor. A figura 8 ilustra este comportamento.

Figura 8. Fenômeno da difração.

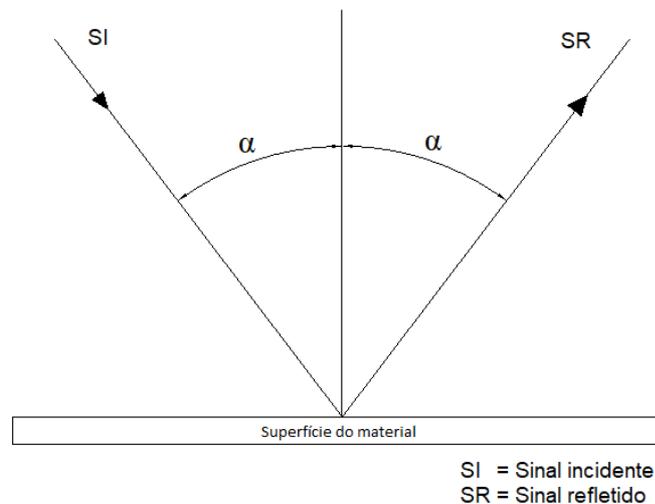


Fonte: Elaboração própria.

3.8.2. Reflexão

A reflexão ocorre quando a onda de rádio incide sobre uma superfície gerando uma onda refletida com o mesmo ângulo de incidência, figura 9. Caso o material possua característica de bom condutor, como alumínio e cobre, grande parte do sinal sobre estes compostos é refletido.

Figura 9. Reflexão.



Fonte: SANCHES, 2013.

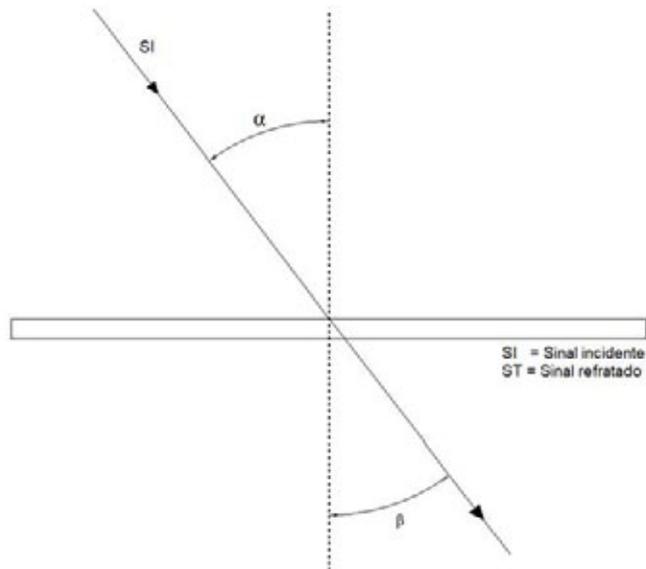
Em ambientes *indoor* a onda de rádio sofre reflexões sobre composições de paredes, janelas, portas, pisos e moveis. O comportamento do sinal neste meio representa pouca interação da onda propagante; mas dependendo da linearidade da superfície, o sinal incidente pode reagir inversamente atenuando o sinal direto.

Segundo PERES (2010) as reflexões podem ocasionar a criação de multi-caminhos, ou seja, o receptor irá receber o mesmo sinal transmitido pelo caminho direto entre as antenas, mas também, de forma defasada, o sinal que sofreu reflexão em um obstáculo.

3.8.3. Refração

O fenômeno da refração ocorre quando o sinal incidente atravessa o material de determinada densidade, alterando a trajetória do caminho da onda de rádio a partir do meio, ou seja, pode tomar caminhos que não estão em linha com receptor.

Figura 10. Refração.



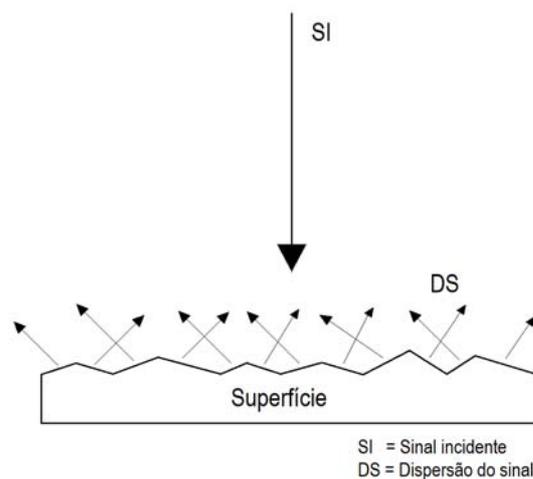
Fonte: SANCHES, 2013

3.8.4. Dispersão

A dispersão é a característica resultante da forma de onda do sinal sendo refletido em várias direções, após incidir sobre uma superfície irregular.

Estes comportamentos podem causar flutuações momentâneas dos sinais de rádio frequência, afetando as leituras de RSSI durante as medidas.

Figura 11. Dispersão.



Fonte: SANCHES, 2013.

3.8.5. Absorção

Absorção é a característica da superfície do material de propriedade não condutora de absorver a onda eletromagnética, transformando-a em calor.

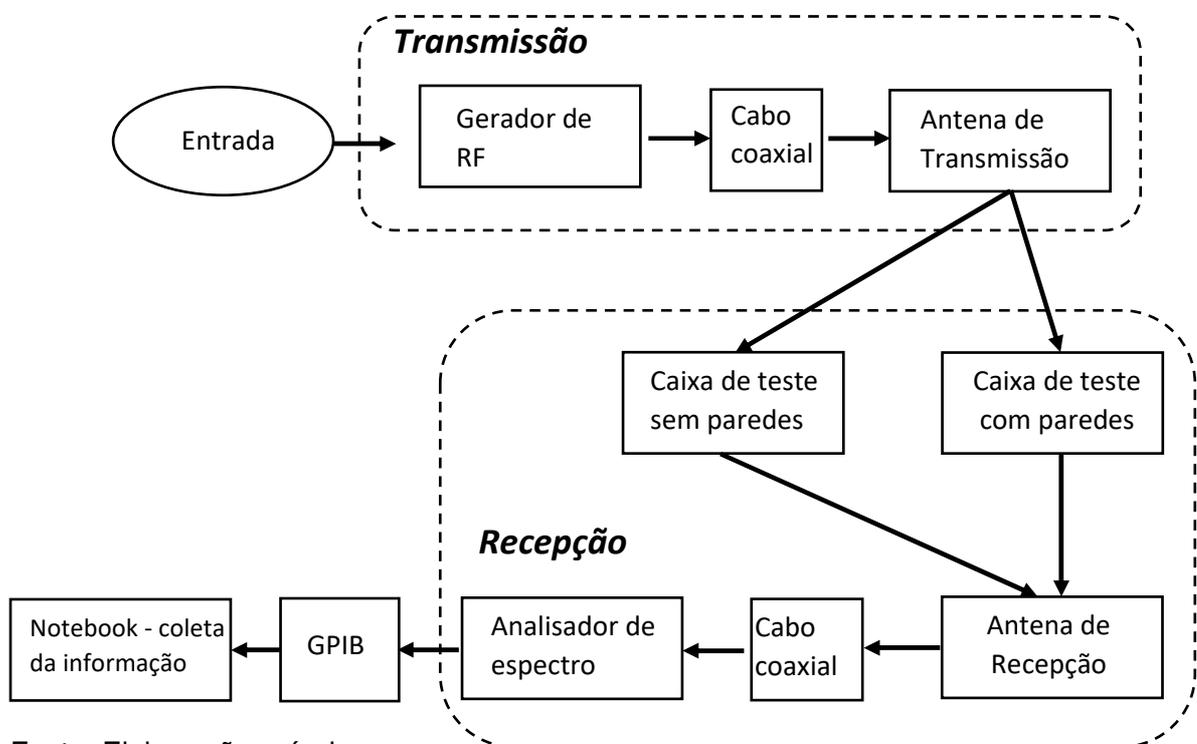
Em câmaras semi-aneatóicas são utilizadas placas absorvedoras “Chambers Absorber” com o papel de absorver o sinal de rádio frequência. O modelo de placa mais utilizado é piramidal, onde o sinal rebate pela superfície da pirâmide do ápice até a base da pirâmide. Nesta ação o sinal é atenuado e toda a energia transformada em calor. A dimensão da pirâmide é proporcional à frequência, quanto menor a frequência maior o tamanho do absorvedor para atenuar o sinal (CHIALINA et al., 2016).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve o *setup* realizado, os materiais envolvidos, os equipamentos e os métodos utilizados para a realização das medidas de atenuação do sinal de rádio frequência irradiado no material construtivo.

A figura 12, ilustra o diagrama de blocos que compõem a coleta de atenuações, sendo necessário realizar o processo de medida com a caixa de teste sem as paredes de vedação e com a caixa contendo as paredes de vedação.

Figura 12. Diagrama de blocos da proposta do setup



Fonte: Elaboração própria.

4.1. Equipamentos para medição.

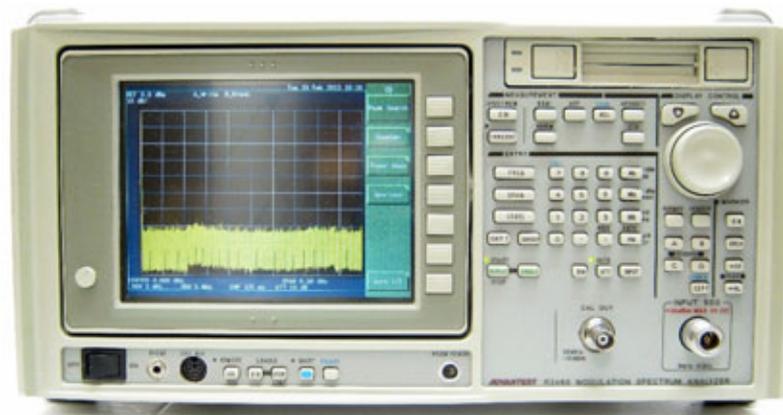
4.1.1. Analisador de Espectro - Advantest R3465

O analisador de espectro, ilustrado na figura 13, permite coletar os harmônicos de sinais de rádio frequência entre 9 kHz a 8 GHz, sendo amplamente utilizado para testes de diagnósticos. O equipamento permite coletar sinais com níveis de até + 30 dBm. Segundo ADVANTEST (2019) o instrumento possui um sintetizador de estabilização de alta velocidade, que reduz significativamente o

tempo de atualização da varredura da banda estreita (amplitude de 5 MHz ou menos), permitindo assim uma medição de alta velocidade, com uma precisão de varredura de alta frequência de 1% ou menos, estabilidade de frequência de 2×10^{-8} / dia e um pré-selecionador integrado a partir de 1.7 GHz, permitindo medições harmônicas com uma faixa dinâmica de 100 dB.

Conforme TUTTLE (2012), “a exibição instantânea do espectro é extremamente valiosa para confirmar as frequências e a natureza das emissões ofensivas, assim como a capacidade de se aproximar de uma pequena parte do espectro.”

Figura 13. Analisador de Espectro



Fonte: (ADVANCED TEST EQUIPMENT CORP., s.d.)

Segundo MORAES (2018) “O analisador de espectro é utilizado para sinais de bandas estreitas, um exemplo deste é um sinal de onda contínua (CW), um sinal CW é um sinal em uma frequência fixa”, portanto o gerador de rádio frequência utilizado para o setup foi configurado para propagar o sinal em CW.

4.1.2. Gerador de Rádio Frequência – ROHDE & SCHWARZ – SMT 06

O gerador de sinais da marca R&S®SMT cobre toda a gama de medições de receptores analógicos convencionais (figura 14). O equipamento fornece uma alta qualidade de sinal, bem como um excelente nível de precisão, uma ampla variedade de modos de modulação e geração de sinal, configuração personalizada e grande facilidade de operação. Os recursos como RF programáveis, LF e varreduras de nível, bem como a correção da resposta de

frequência externa, fazem do SMT uma fonte ideal para medições de EMS (ROHDE & SCHWARZ, 2019).

O equipamento pode gerar sinal de 5 kHz à 6 GHz, com potência de saída de -114 dBm a +13 dBm.

Figura 14. Gerador de RF



Fonte: (ROHDE&SCHWARZ, s.d.)

4.2. Antena para a medição do sinal

A antena Log periódica ilustrada na figura 15, trabalha com a faixa de 380 MHz a 18 GHz para medições de amplas bandas de frequência, tornando-se uma antena direcional profissional voltada para medições de EMC (*Electromagnetic compatibility*), ou seja, um ensaio que permite definir se os equipamentos e sistemas elétricos funcionem de maneira aceitável em seu ambiente eletromagnético; além disso, a antena também pode ser utilizada para medições em ambientes externos. (AARONIA, 2019) As características técnicas são apresentadas na tabela 7.

Figura 15. Antena Aaronia Log periódica

Fonte: Elaboração própria.

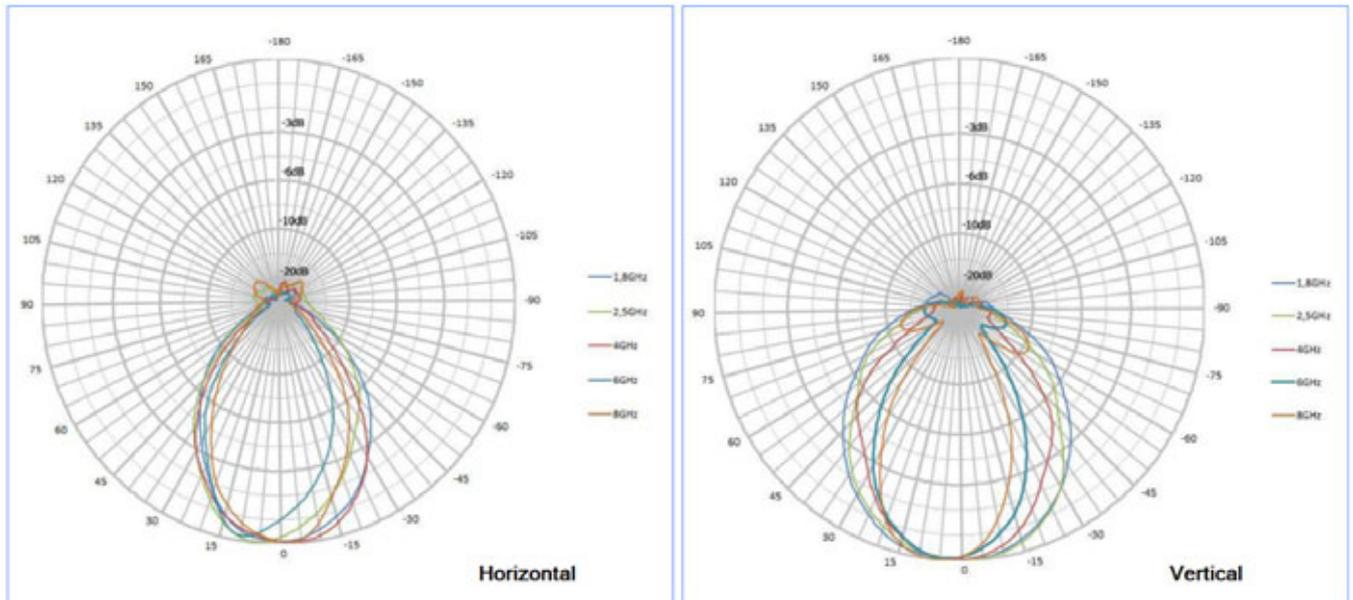
Tabela 7. Informações técnica da antena Aaronia 30180

Frequencia	380 MHz – 18 GHz
Ganho	5 dBi
Largura de feixe na horizontal	60°
Largura de feixe na vertical	65°
Impedância	50 Ohms
VSWR	< 1:2,5 avg.
Conector	SMA fêmea

Fonte: (AARONIA, 2019)

A figura 16 mostra o diagrama de irradiação da antena Aaronia 30180, ilustrando a largura do feixe na horizontal e na vertical e seus desvios, conforme cada faixa de frequência. Segundo (WILLIANS, 2001), a antena está orientada para a máxima faixa de resposta. Conhecer o fator de resposta de uma antena é o parâmetro mais importante, sendo mostrada cada faixa de banda larga calibrada (em dB / m) versus a frequência. Com um instrumental denominado *network analyzer* é possível varrer a faixa de frequência da antena, medir o desempenho de atuação e os piores ganhos da antena.

Figura 16. Diagrama de irradiação antena Log periódica.

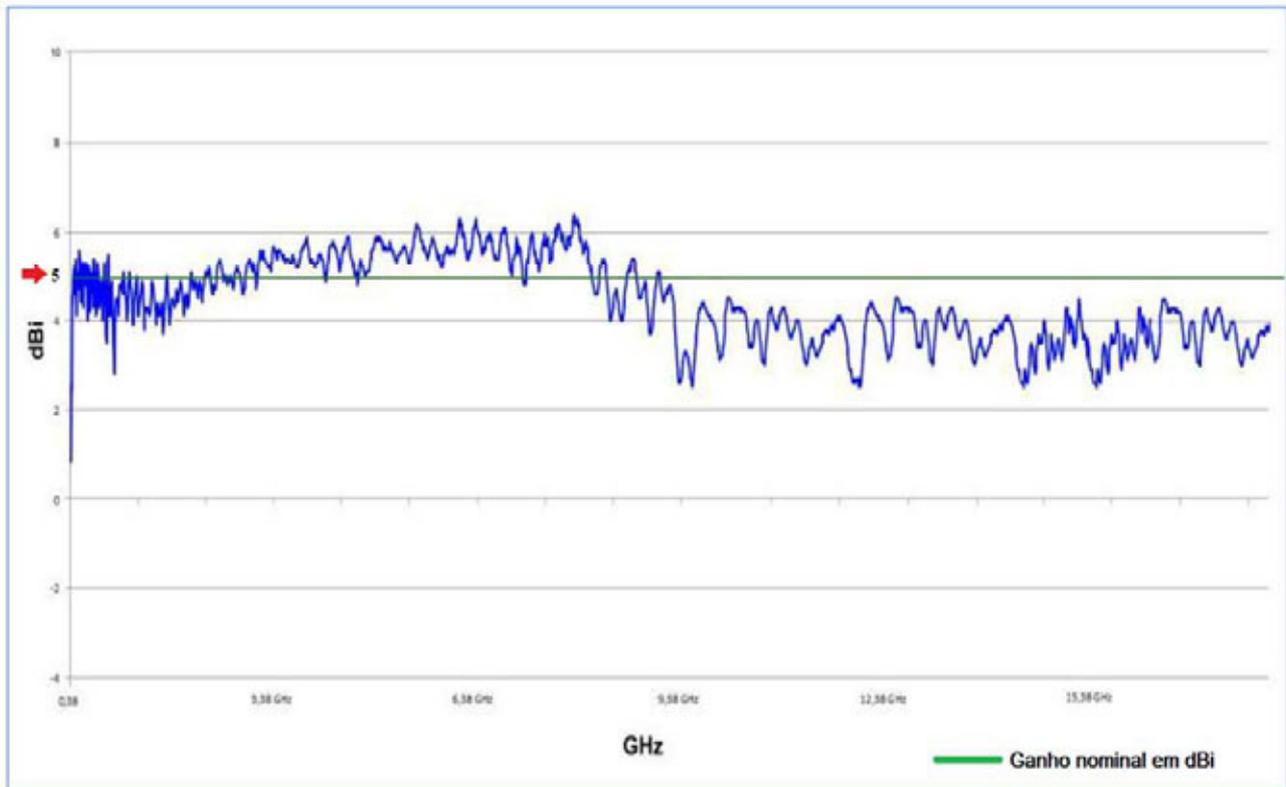


Fonte: (adaptado de AARONIA AG, s.d.)

Para conhecer os ganhos de diretividade da antena em toda a sua faixa de trabalho, a figura 17 mostra o diagrama disponibilizado pelo fabricante, contendo informações dos picos de ganhos em dBi referente a frequência de 380MHz à 18GHz. A AARONIA AG informa que o ganho nominal da antena é 5dBi.

A antena log periódica será utilizada na transmissão do sinal no setup de medições, devido a suas características físicas projetadas para aplicação direcional com lóbulos de irradiação mais fechados, além disso, com a faixa dinâmica de 380 MHz à 18 GHz, pode ser trocada a frequência sem a necessidade de substituir antena. No trabalho de FERREIRA et al. (2018), ele utilizou dois modelos idênticos de antena log-periódica para realizar as medidas de transparência FSS. No presente trabalho será utilizada apenas uma antena log-periódica no ambiente externo devido ao tamanho reduzido da câmara de coleta.

Figura 17. Diagrama de ganho em dBi da antena Aaronia.



Fonte: (adaptado de AARONIA AG, s.d.).

As antenas descritas a seguir correspondem a faixa de frequência de 902 -928 MHz (figura 18), conforme as características técnicas apresentadas na tabela 8.

Figura 18. Antena Hyperlink HG908P.



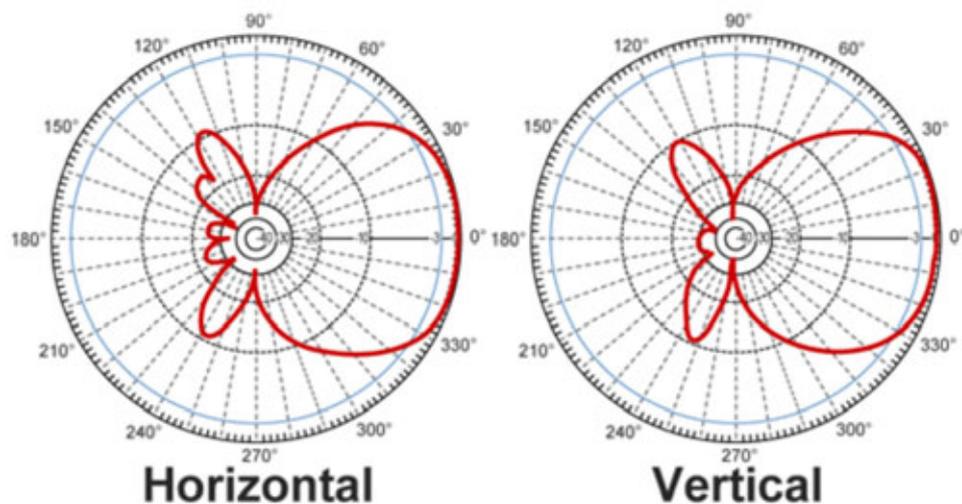
Fonte: Própria.

Tabela 8. Informações técnicas das antenas HG908P

Frequência	902 MHz – 928 MHz
Ganho	8 dBi
Largura de feixe na horizontal	75°
Largura de feixe na vertical	65°
Impedância	50 Ohms
VSWR	< 1.5:1 avg.
Conector	N fêmea

Fonte: (L-com, HG908P, 2019).

Na figura 19, apresenta-se o diagrama de irradiação, ilustrando a largura do feixe na horizontal e vertical de trabalho, da antena HG908P da L-com.

Figura 19. Diagrama de irradiação antena HG908P.

Fonte: (L-com, HG908P, 2019).

A figura 20 apresenta o modelo de antena para coleta de sinal, especificamente para a faixa de frequência de 2400-2500 GHz. Este modelo de antena possui entrada individualizada para cada polarização, permitindo trabalhar em dupla polarização em áreas suscetíveis aos efeitos de interferência de múltiplos caminhos. Ao fornecer diversidade espacial e de polarização cruzada, o circuito interno do rádio pode selecionar entre as duas antenas de recepção, para uma melhor recepção de rede sem fio.

Figura 20. Antena L-com RE11DP.

Fonte Própria.

A tabela 9 elenca as principais características técnicas da antena RE11DP, com a largura de feixe de irradiação na horizontal e vertical.

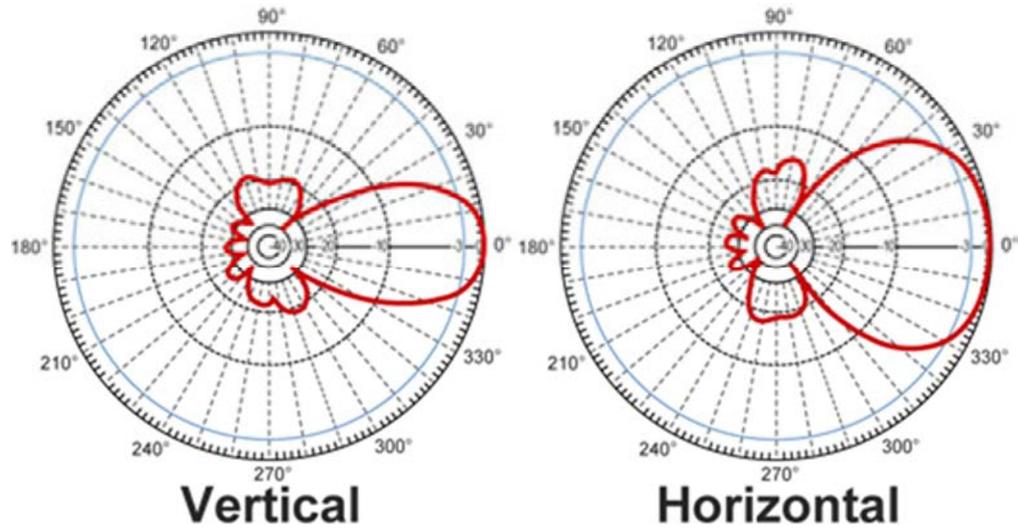
Tabela 9. Informações técnicas das antenas RE11DP

Frequência	2400 MHz – 2500 MHz
Ganho: Antena 1/ Antena 2	11 dBi /11 dBi
Largura de feixe na horizontal	75°
Largura de feixe na vertical	65°
Impedância	50 Ohms
Potência máxima de entrada	25 Watts
VSWR	< 1.5:1 avg.
Conector	N fêmea

Fonte: (L-com, RE11DP, 2019).

A figura 21 apresenta o diagrama de irradiação, ilustrando a largura do feixe na horizontal e vertical de trabalho, da antena RE11DP da L-com. No diagrama é possível notar o lóbulo de propagação de ambas as orientações da antena.

Figura 21. Diagrama de irradiação antena RE11DP.



Fonte: (L-com, RE11DP, 2019).

A figura 22 mostra o modelo de antena para coleta de sinal especificamente para a faixa de frequência de 2400-2500 MHz e 5125-5850 MHz, calibrada exclusivamente para as duas faixas de trabalho. Na tabela 10, a seguir, são elencadas as suas características técnicas.

Figura 22. Antena L-com HG2458-09P.



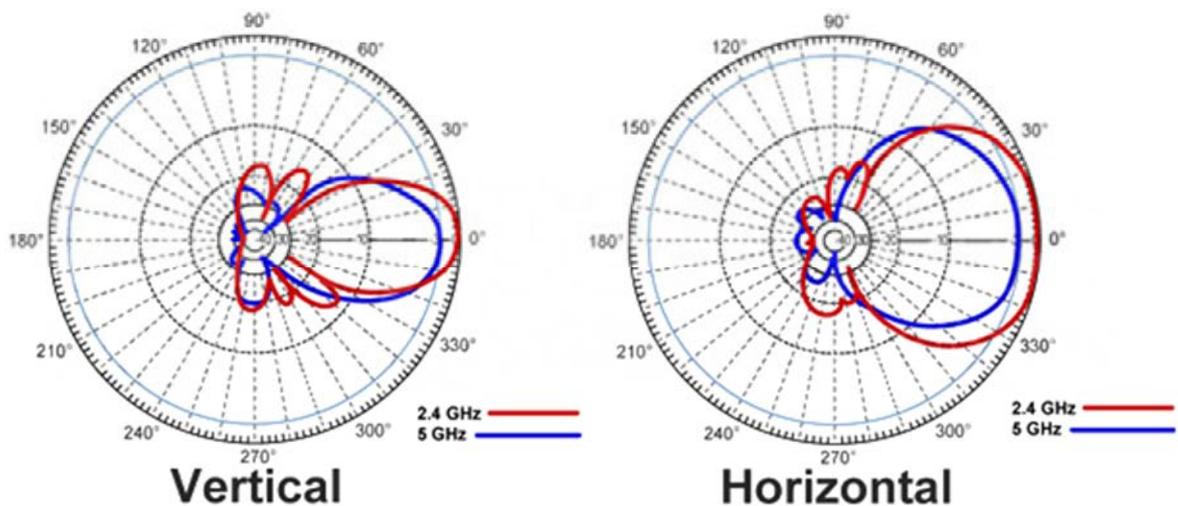
Fonte Própria.

Tabela 10. Informações técnicas das antenas HG2458-09P

Frequência	2400 MHz – 2500 MHz
	5125 MHz – 5850 MHz
Ganho: Antena 1/ Antena 2	9 dBi @ 2400-2500 MHz 6 dBi @ 5125-5850 MHz
Largura de feixe na horizontal	65°
Largura de feixe na vertical	25°
Impedância	50 Ohms
Potência máxima de entrada	1 Watts
VSWR	< 1.5:1 avg.
Polarização	Horizontal / Vertical
Conector	N fêmea

Fonte: (L-com, HG2458-09P, 2019)

A figura 23 ilustra o diagrama de irradiação da antena HG2458-09P, que na verdade trata-se de duas antenas em uma. Uma antena de elemento duplo de 2,4 GHz e uma antena de elemento duplo de 5 GHz acoplada a um único conector de alimentação. Este modelo de antena permite receber sinais separados de 2,4 GHz e 5 GHz e combiná-los em um único feed de alimentação (L-com, HG2458-09P, 2019). Os lóbulos de irradiação de cada faixa de frequência apresentam larguras de feixe muito parecidas entre si.

Figura 23. Diagrama de irradiação da antena HG2458-09P.

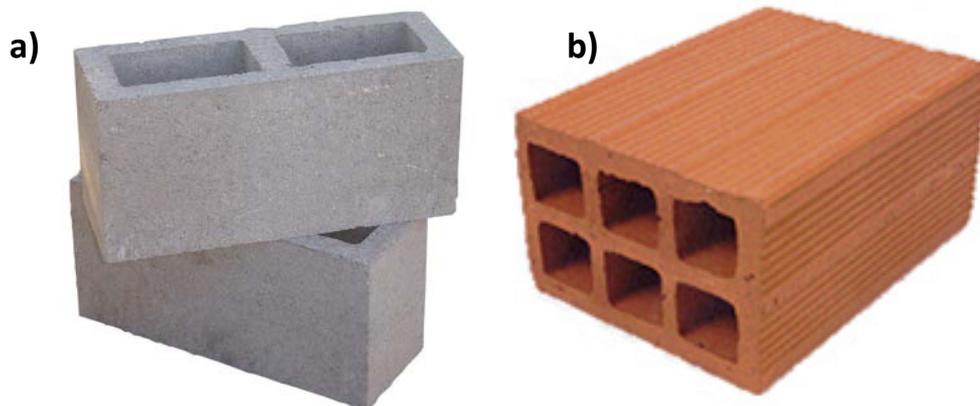
Fonte: (L-com, HG2458-09P, 2019)

4.3. Materiais

Os materiais utilizados para a construção de cada amostra foram adquiridos em lojas de materiais de construção, seguindo os padrões oferecidos no mercado brasileiro. Na figura 24, ilustra-se os tipos e formato dos tijolos e blocos de concreto estrutural mais comuns.

O presente estudo não aborda os elementos que constituem as composições químicas do concreto e da argila utilizada para produção de cada unidade estrutural.

Figura 24. Materiais de construção utilizados, a) Blocos estruturais; b) Tijolos;



Fonte: Própria.

Os materiais pesquisados foram medidos conforme a tabela 11, a seguir:

Tabela 11. Materiais construtivos

Tipo	Característica	Peso
Tijolos de cerâmica 6 furos	Não estrutural	2,2 kg
Tijolos de cerâmica à vista	Não estrutural	1 kg
Bloco de cerâmica	Estrutural	5,55 kg
Bloco de concreto L 9 cm	Semi-Estrutural	9 kg
Bloco de concreto L 14 cm	Semi-Estrutural	10,7 kg

Fonte: Própria.

4.4. Lista dos materiais e suas variantes.

Para construção das amostras de paredes, utilizou-se de argamassa composta por cimento industrializado e areia média, na distribuição em partes de 3X1, ou seja, três partes de areia para uma parte de cimento; com o assentamento em plano horizontal de cada peça de material de revestimento, respeitando a distribuição de amarração da parede conforme pode ser visualizada nas figuras 25, 26, 27, 28 e 29. A distância entre as fileiras de tijolos e blocos, utilizou-se o padrão utilizado na construção civil, entre 1 a 1,5 cm de argamassa para cada camada.

As amostras possuem exatamente 50 cm X 50 cm. Na sua construção, foi utilizado um quadro de madeira como gabarito para alcançar as medidas pretendidas neste trabalho.

A seguir são descritas as características de cada tipo de material construtivo.

4.4.1. Bloco cerâmico não estrutural de 6 furos.

A medida de cada bloco cerâmico com cavidade de 6 furos é representado pelas dimensões de:

- Comprimento de 24,5 cm;
- Largura de 14,4 cm;
- Altura de 11,5 cm;
- Peso de 2,2 kg.

A medida dos blocos cerâmicos não estruturais são ilustrados conforme a figura 25.

Figura 25. Parede de tijolos de 6 furos.



Fonte: Elaboração própria.

O peso alcançado nesta amostra de parede foi de 41,1 kg, para uma área de aproximadamente 2500 cm², sendo que corresponde a 164,4 kg/m².

4.4.2. Bloco cerâmico estrutural de 14 cm

A medidas de cada bloco cerâmico estrutural com cavidades, é representado pelas dimensões de:

- Comprimento de 29 cm;
- Largura de 14 cm;
- Altura de 19 cm;
- Peso de 5,55 Kg;

A medidas dos blocos estruturais cerâmicos, são ilustrados conforme a figura 26:

Figura 26. Parede de blocos cerâmicos estrutural de 14 cm



Fonte: Elaboração própria.

O peso alcançado nesta amostra de parede foi de 47 kg, para uma área de aproximadamente 2500 cm², sendo que corresponde a 188 kg/m².

4.4.3. Tijolo comum do tipo à vista

A medidas de cada tijolo comum sem cavidades é representado pelas dimensões de:

- Comprimento de 19,4 cm;
- Largura de 9 cm;
- Altura de 4,5 cm;
- Peso de 1 Kg.

A medidas dos tijolos comuns são ilustrados conforme a figura 27:

Figura 27. Parede de tijolos a vista.



Fonte: Elaboração própria.

O peso alcançado nesta amostra de parede foi de 40,250 kg, sendo que para uma parede de um metro quadrado o valor corresponde a 161 kg/m².

4.4.4. Bloco semi-estrutural de concreto - 9 cm de vedação

A medidas de cada bloco semi-estrutural de concreto com cavidades, é representado pelas dimensões de:

- Comprimento de 39 cm;
- Largura de 9 cm;
- Altura de 18,5 cm;
- Peso de 9 Kg;

A medidas dos blocos semi-estruturais de concreto são ilustrados conforme a figura 28:

Figura 28. Parede de bloco semi-estrutural de concreto.



Fonte: Elaboração própria.

O peso alcançado nesta amostra de parede foi de 46,1 kg, portanto para uma parede de um metro quadrado o volume corresponde a um peso de 184,1 kg/m².

4.4.5. Bloco semi-estrutural de concreto 14 cm de vedação

A medidas de cada bloco estrutural de concreto com cavidades, é representado pelas dimensões de:

- Comprimento de 38 cm;
- Largura de 14 cm;
- Altura de 19 cm;
- Peso de 10,7 kg;

A medidas dos blocos semi-estruturais de concreto são ilustrados conforme a figura 29:

Figura 29. Parede de bloco semi-estrutural de concreto de 14 cm.



Fonte: Elaboração própria.

O peso alcançado nesta amostra de parede foi de 53,5 kg, portanto para uma parede de um metro quadrado de blocos semi-estrutural de concreto com largura de 14 cm corresponde a um peso de 214 kg/m².

4.5. Calibração do sistema de medição.

Primeiramente, é necessário conhecer a atenuação do espaço livre. Esta etapa é importante para colocar à prova as medidas de atenuação do sinal de rádio frequência no âmbito de ganho do sistema na transmissão e recepção. Para isso, foi medida em ambiente livre, ou seja, sem a obstrução do material construtivo e da estrutura com blindagem eletromagnética.

A partir desta medida, tem-se o valor da perda no espaço livre. Para cada frequência utilizada é importante saber qual a perda do sinal na frequência sobre a distância.

A figura 30 ilustra a distribuição dos equipamentos para realizar estas medidas.

Figura 30. Medida do sinal sem o material construtivo na câmara de teste.



Fonte: Elaboração própria.

As frequências utilizadas para a medidas de perda de sinal no sem a obstrução do material foram: 915 MHz, 1920 MHz, 2412 MHz, 2437 MHz, 2462 MHz, 5150 MHz, 5350 MHz, 5470 MHz, 5725 MHz e 5850 MHz, sendo que as faixas de frequências foram medidas com ambas antenas TX e RX nas posições vertical e, posteriormente, realizadas novamente sobre todas as frequências listadas com antena na horizontal.

A pesquisa utilizou os comprimentos de onda calculados pela fórmula:

$$\lambda = c/f \quad (\text{eq. 8})$$

onde:

λ - comprimento de onda;

c - representa a velocidade da luz no vácuo;

f - é a frequência,

Sendo que para cada frequência medida tem-se um comprimento de onda que deve ser respeitado em relação ao tamanho da amostra, a saber:

- 915 MHz – $\lambda = 32,8 \text{ cm};$
- 1920 MHz – $\lambda = 15,62 \text{ cm};$
- 2412 MHz – $\lambda = 12,43 \text{ cm};$
- 2437 MHz – $\lambda = 12,31 \text{ cm};$
- 2462 MHz – $\lambda = 12,18 \text{ cm};$
- 5150 MHz – $\lambda = 5,82 \text{ cm};$
- 5350 MHz – $\lambda = 5,60 \text{ cm};$
- 5470 MHz – $\lambda = 5,48 \text{ cm};$
- 5725 MHz – $\lambda = 5,24 \text{ cm};$
- 5850 MHz – $\lambda = 5,12 \text{ cm};$

Cabo coaxial.

Os cabos condutores do sinal utilizado no *setup* foram medidos utilizando a seguinte configuração: conectado na saída de sinal do gerador RF da *Rohde Schwarz* e a outra ponta do cabo foi introduzida no analisador de espectro. A potência gerada deve ser negativa, sendo o valor utilizado de -60 dBm, isto para não saturar a entrada do analisador e danificar o *front-end* do equipamento. As telas de capturada no analisador de espectro estão ilustradas na figura 42, no capítulo resultados. O nível medido foi menor que -60 dBm, sendo que a diferença entre o valor gerado corresponde a perda que ocorre no cabo, sobre a frequência de trabalho.

A tabela 12 mostra a perda dos cabos de conexão, em dB, para cada faixa de frequência utilizada na pesquisa exploratória.

Tabela 12. Perda por atenuação em cabos de conexão Lmr-240.

Frequência	Perda em dB	Comprimento
915 MHz	2,73 dB	5 m
1915 MHz	2,83 dB	
2450 MHz	3,30 dB	
5250 MHz	4,63 dB	

Fonte: Elaboração própria.

Após encontrar os valores de perda no cabo de conexão, para cada frequência, foi realizada a medida de potência na saída do gerador de *RF*, utilizando o mesmo cabo de 5 metros medidos na tabela 12, no atenuador de 30 dB da marca *JBM instrumentos*, conectado em um lado do atenuador no gerador e na outra saída inserida ao analisador de espectro. A potência gerada nesta medição foi de 0 dBm no gerador, com as perdas de conexão dos cabos somados a perda de 30 dB do atenuador. No apêndice D, apresentam-se os valores encontrados para cada faixa de frequência medida.

4.6. Validação do ambiente de emulação.

Para realizar as medidas de atenuação do sinal de rádio frequência sobre os materiais, foi montado um *setup* composto de geradores de RF, analisadores de espectros, cabos de alimentação, antenas e acessórios.

O sistema para coleta de dados foi composto, utilizando os equipamentos analisadores de sinais de rádio frequência de mercado.

Foi elaborada uma câmara de prova, com as medidas de 125 cm de comprimento por 50 cm largura e 50 cm de altura, com o volume total de 312,5 litros no interior da caixa. Conforme pode ser observado na figura 31, a estrutura foi construída toda em cantoneiras de alumínio de 3/8" com o fechamento das paredes em tela de alumínio de 2 mm por 2 mm. A estrutura foi montada utilizando a premissa de um invólucro totalmente blindado de fontes eletromagnéticas externas, ou seja, uma gaiola de *Faraday*.

Além da blindagem realizada pela tela de alumínio, que foi envolvida na caixa, também foi colocada uma blindagem extra de RF composta de uma malha com 23% cobre, 20% níquel e 50% de poliéster, com eficiência de blindagem de 75.1 a 97.1 dB segundo especificações do fabricante.

Figura 31. Processo de construção da câmara de teste.



Fonte: Elaboração Própria.

Para colocar cada amostra de material no interior da câmara de medição, foram construídas algumas combinações de paredes das mais comuns utilizadas nos meios construtivos brasileiros. Cada tipo de parede foi montado utilizando as medidas de 50 cm de altura por 50 cm de comprimento e com espessuras referentes a cada tipo de material. Cada painel foi submetido a câmara de medição, sendo que após cada coleta de atenuação, os resultados das medições obtidos neste *setup* foram utilizados posteriormente para validar a ferramenta de predição.

Cada amostra foi posicionada a uma distância de dois metros da antena de transmissão, sendo um metro de distância para a antena de recepção, conectada no analisador de espectro. Ambas as antenas foram direcionadas para o centro da amostra. O modelo da antena de transmissão utilizado neste *setup* foi antena direcional e de recepção do tipo painel com blindagem de fontes externas.

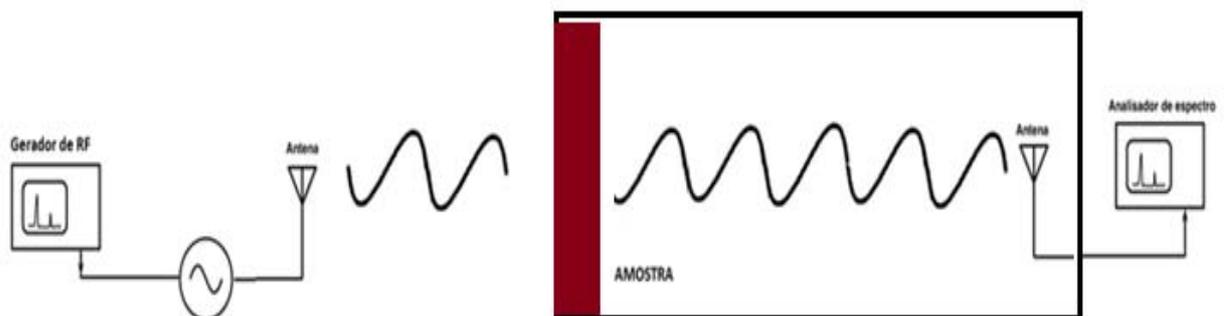
A altura utilizada para a antena foi a um metro do chão, irradiando potência de transmissão na ordem de +10 dBm de potência TX.

Em todas as coletas foram repetidos o procedimento com a antena transmissora na polarização vertical e horizontal.

Com o *laptop* conectado ao analisador de espectro, utilizando o acessório GPIB - *General Purpose Interface Bus*, que é uma interface de comunicação paralela para USB utilizada para coletar o *printscreen* da tela do instrumental, utilizou-se o software de coleta instalado no computador, sendo que a partir dessa comunicação foram extraídos todos os valores de recepção RSSI da emulação do sinal.

Uma amostra deste *setup* pode ser observada nas figuras 32, 33 e 34.

Figura 32. Uma amostra sendo submetida a medida de atenuação.



Fonte: Elaboração Própria.

É importante destacar que o local escolhido para realizar as medidas de atenuações na câmara de teste possui baixa recepção de fontes de sinais oriundos de sistemas Wi-Fi, RSSF e telefonia celular.

4.7. Setup

O *setup* foi montado utilizando a “câmara” com as medidas 125 cm por 50 cm por 50 cm, construída em cantoneiras de alumínio. Em cada quadro foi colocada individualmente a tela com espaçamento entre fio de 2 mm. A figura 33 ilustra a montagem da caixa retangular.

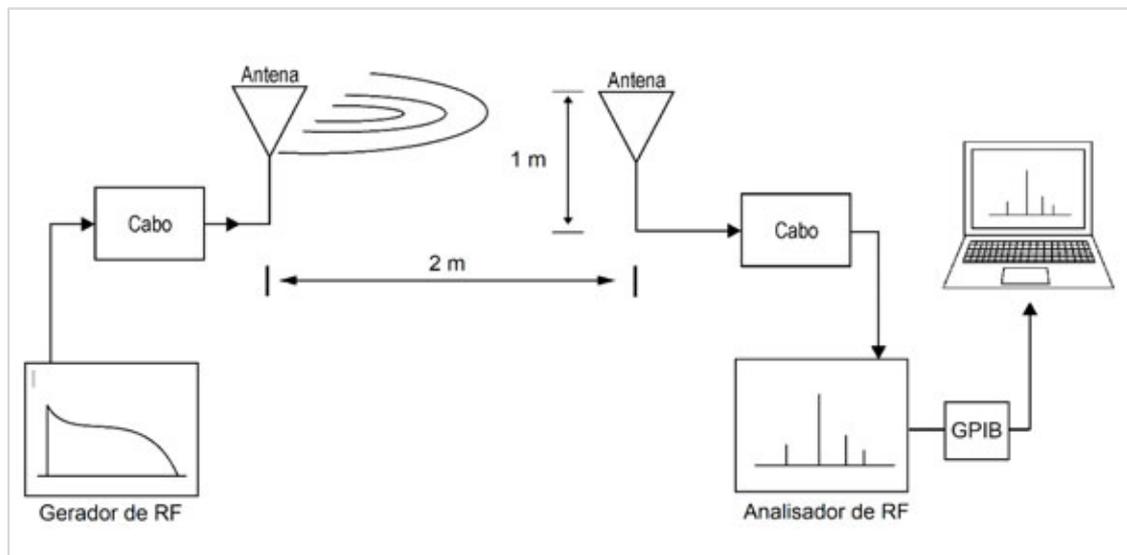
4.7.1. Configuração da medição:

As antenas *patch* direcional de tamanhos idênticos foram utilizadas para a recepção e distribuídas conforme cada frequência de medição, uma antena log-periódica foi conectada ao gerador de rádio frequência e a outra antena *patch* direcional fixada no interior da câmara de prova ligada ao analisador de espectro. As medidas foram realizadas com as antenas na polarização vertical e polarização horizontal.

O equipamento de teste é uma estrutura de alumínio com a dimensão de 1.25 m de largura e 0.50 m de altura, e seu centro foi cortado em uma forma quadrada de 50 cm x 50 cm (altura x largura).

A estrutura foi colocada sobre suporte com o espaçamento mínimo de 1 metro do chão, a partir disso com todas as antenas alinhadas foi possível medir a perda do sinal no espaço livre. Na figura 33, ilustra-se o *setup* para a coleta da perda no espaço livre.

Figura 33. Estrutura para coleta de dados.

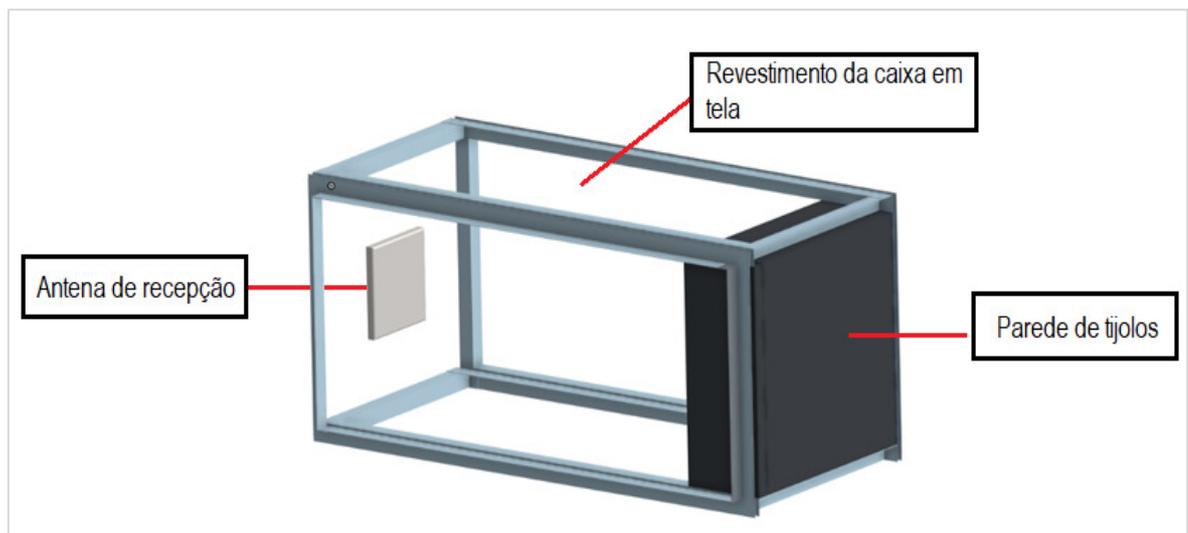


Fonte: Elaboração Própria.

Após o sinal passar pelo material no interior da câmara, as placas absorvedoras minimizam a contaminação por reflexão e dispersão do sinal, que pode ocorrer no ambiente fechado.

A figura 34 ilustra a montagem da câmara com a blindagem eletromagnética para a coleta do sinal atenuado. As paredes da câmara foram revestidas em tela e tecido com propriedades de bloqueio eletromagnético, sendo o material colocado em uma das extremidades.

Figura 34. Disposição do material na estrutura.



Fonte: Elaboração própria.

Para cada frequência o material foi coletado em três situações. Primeiramente, foi medida a atenuação sem a parede inserida na caixa, com somente a câmara de teste e as antenas transmissora e receptora. Em seguida, foi coletada o sinal em ambiente obstruído pelas paredes, ou seja, realizando as medidas em dois cenários, com as duas antenas na horizontal e depois na vertical.

Foram realizadas, no total 1800 coletas, com o número de 30 medidas em cada frequência, para estabelecer um índice de confiança nos dados coletados.

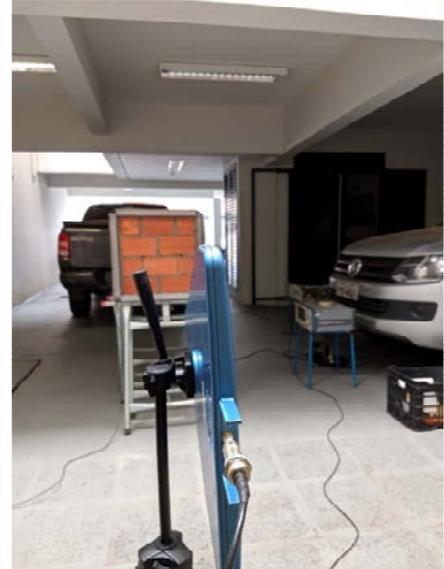
Conforme os materiais são introduzidos na câmara de ensaio, são colocadas em teste para cada amostra de material a frequências de 915 a 5850 MHz. A perda está representada pelo eixo y em dB; número de medidas representada pelo eixo x, sendo que a constante informada pela legenda em dB representa os valores das medidas de atenuação do software de predição. O gráfico resultante, elaborado pelo autor, está no Apêndice (C).

As figuras 35 e 36 ilustram o *setup* de coleta de atenuações para tijolos de cerâmica.

Figura 35. Medição de parede de tijolos cerâmicos de 6 furos.



Figura 36. Medida realizada na posição vertical.



Fonte: Elaboração própria.

A figura 37 ilustra o *setup* de medidas de atenuações para o material bloco de cerâmica estrutural de 14 cm de largura.

Figura 37. Medição de parede de blocos de cerâmica estrutural.



Fonte: Elaboração própria.

Neste trabalho, foi elaborado um *setup* experimental montado em ambiente externo, visando coletar o sinal sem sofrer interferências de fontes de sinais internos e externos.

A estrutura utilizada permite anular os raios refratados internamente no sistema, evitando que o sinal se amplifique no interior da câmara de teste. A propagação do sinal foi coletada a partir de antenas posicionadas estrategicamente no interior da câmara.

As figuras 38 e 39 mostram a distribuição dos equipamentos para a coleta de atenuação para tijolos do tipo à vista.

Figura 38. Medição de parede de tijolos cerâmicos do tipo à vista.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 39. Vista do setup de coleta de dados para tijolos à vista.



As figuras 40 e 41 ilustram a coleta de dados de atenuações para parede de blocos semi-estrutural de concreto.

Figura 40. Medição de parede blocos de concreto semi-estrutural.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 41. Vista do setup de coleta de dados para blocos de concreto semi-estrutural.



A figura 42 ilustra a coleta de dados de atenuações para parede de blocos de concreto semi-estrutural com largura de vedação de 14 centímetros.

Figura 42. Medição de parede blocos de concreto semi-estrutural de 14 cm.



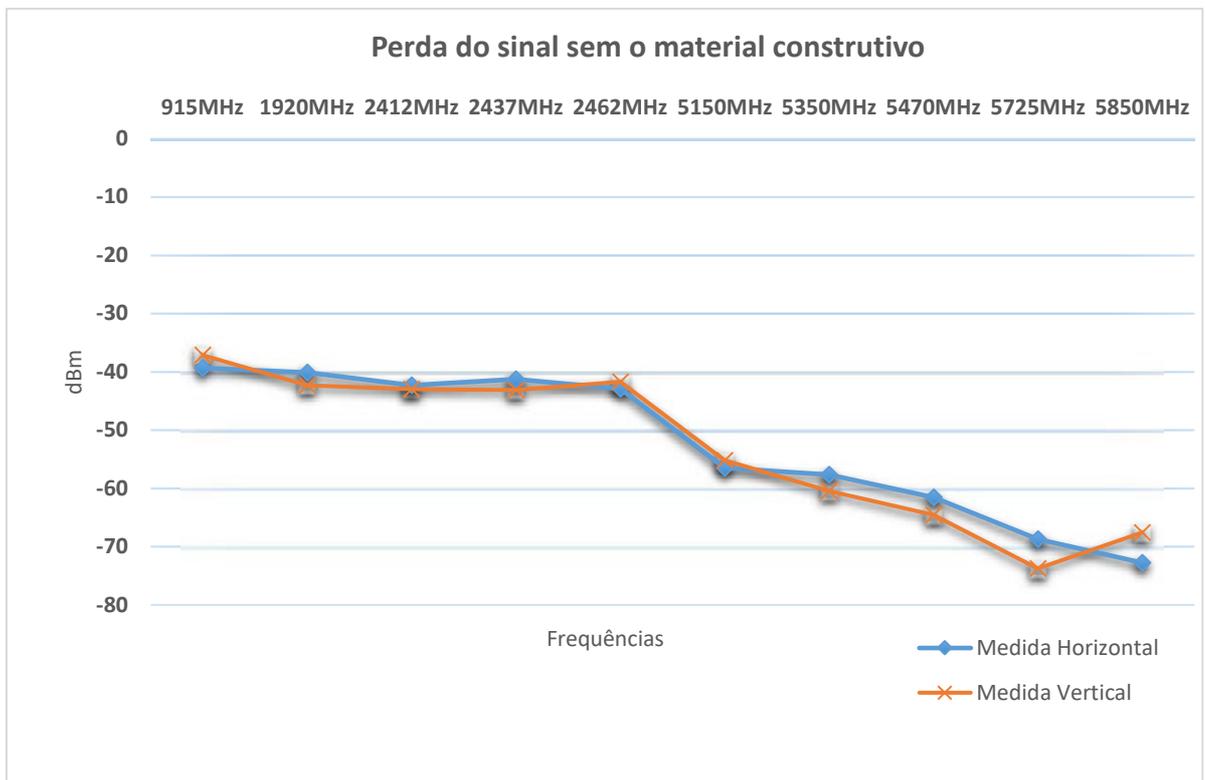
Fonte: Própria.

5. RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados das medidas de atenuações dos materiais construtivos mais comuns utilizados na construção civil brasileira. Além disso, são apresentadas as simulações de predição de cobertura de sinal executadas pelo autor. Todas as amostras foram medidas em caráter exploratórios utilizando a câmara de ensaio. As tabelas e as capturas de tela do analisador de espectro estão em anexo no trabalho.

A seguir, no gráfico 1, mostra-se a representação da perda por atenuação do sinal sem o material construtivo no setup.

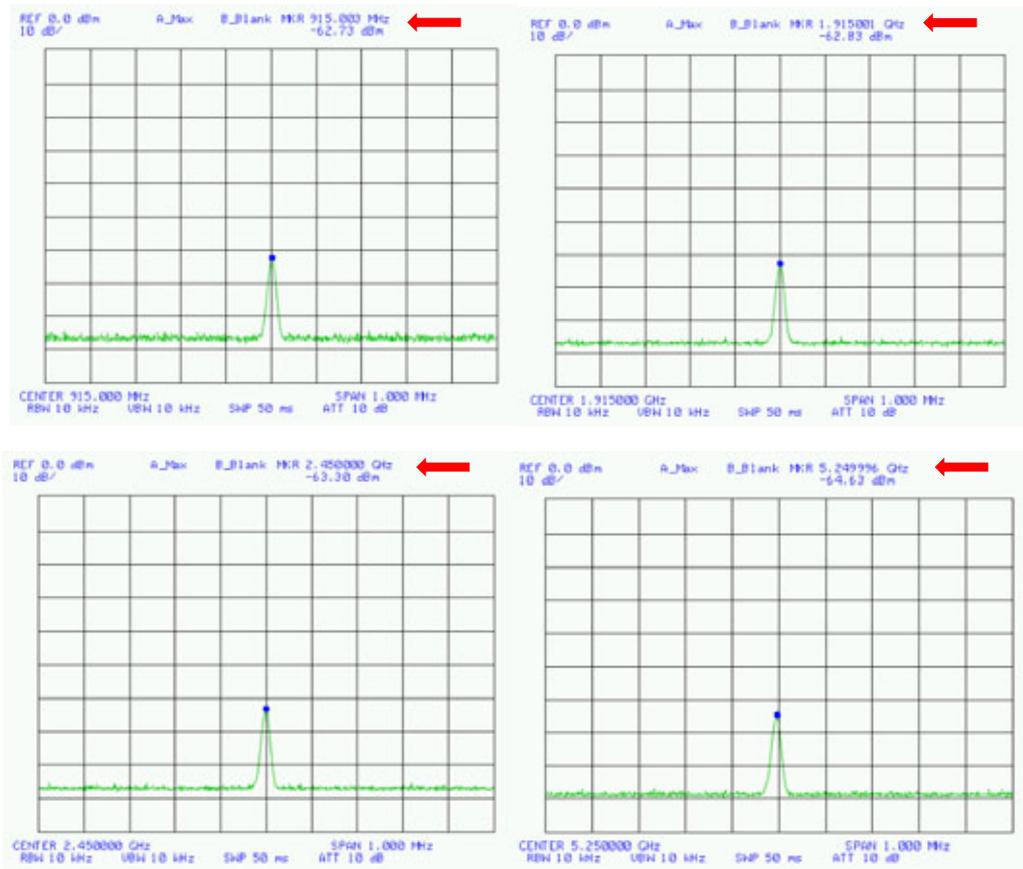
Gráfico 1. Perda do sinal sem as amostras de parede para as frequências em estudo.



Fonte: Elaboração própria.

Os valores apresentados na tabela 12, no capítulo anterior, relacionam as medidas de perda encontradas nos cabos conforme a frequência, ilustrada na figura 43.

Figura 43. Captura de espectro da perda de cabo.



Fonte: Elaboração própria.

Com os valores medidos sobre o cabo LMR-240, foi possível utilizar estes parâmetros de perda de atenuação do cabo coaxial nos cálculos para cada frequência inserida no gerador de RF junto com o atenuador de 30 dB, a fim de comprovar a potência de saída do gerador e garantir acuracidade do sinal gerado.

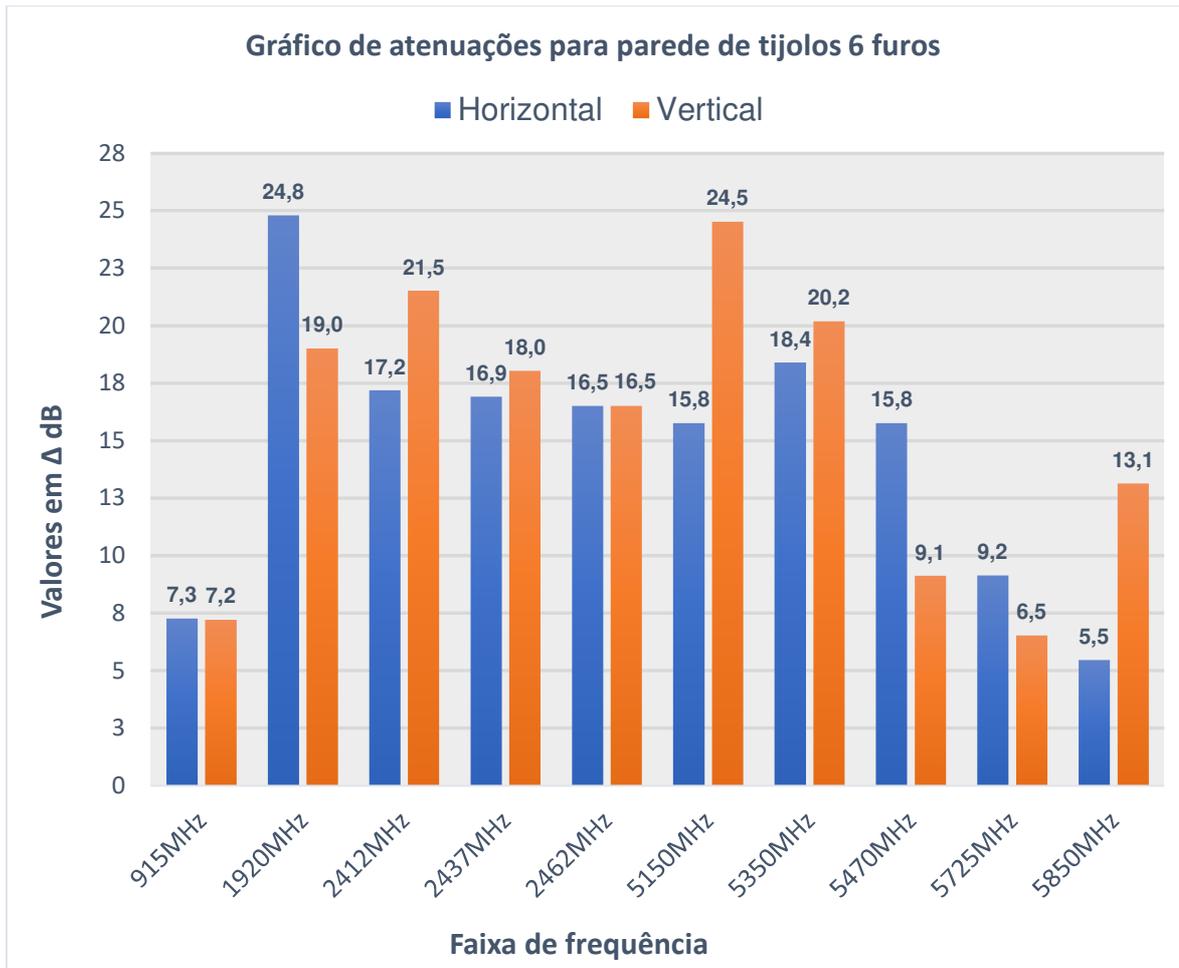
5.1. Medidas de atenuações nos materiais

Através dos resultados apresentados no gráfico 2, gráfico 3, gráfico 4, gráfico 5 e gráfico 6, é possível visualizar as medidas de cada tipo de material utilizado neste trabalho, onde se mostra as médias obtidas de atenuações, com o valor corrigido da perda no espaço livre.

5.1.1. Bloco cerâmico não estrutural - largura 14,4 cm

O gráfico 2 mostra as médias a partir do gráfico C.1 no (Apêndice C), para todas as frequências coletadas, com o valor corrigido da perda do sinal sem o material construtivo na câmara de teste.

Gráfico 2. Gráfico de médias de atenuações para tijolos cerâmicos não estruturais de 6 furos.



Fonte: Elaboração própria.

A tabela 13 apresenta os valores coletados para cada frequência, as antenas utilizadas para a coleta do sinal e a medida com as antenas na horizontal e na vertical. Além disso, é apresentado o desvio padrão para o valor medido sobre a quantidade de amostra coletadas.

Tabela 13. Resultado de atenuações para tijolos de cerâmicas não estrutural de 6 furos.

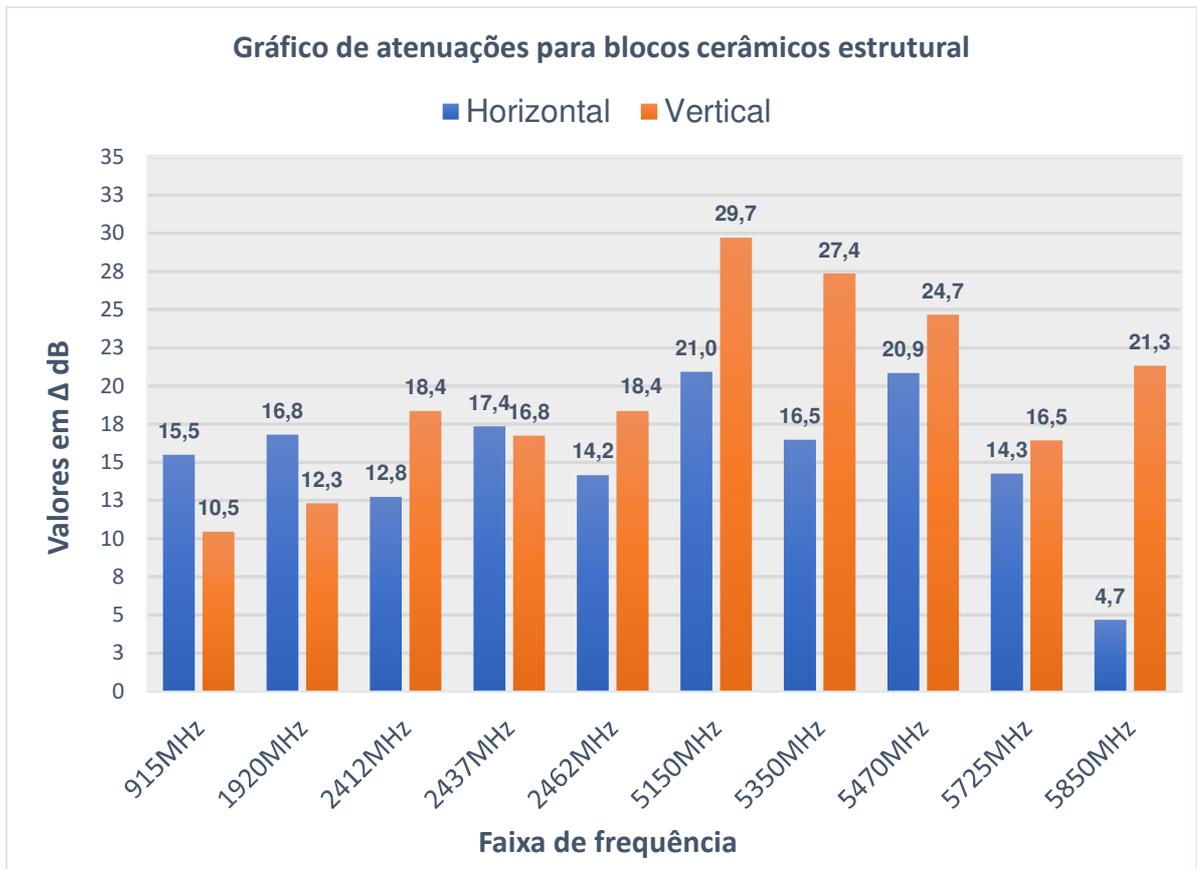
Frequência	Antena	dB		dB	
		dB média Horizontal	desvio (H) padrão(dB)	dB média Vertical	desvio (V) padrão(dB)
915 MHz	HG908P	7,2 dB	0,16 dB	7,2 dB	0,05 dB
1920 MHz	RE11DP	24,8 dB	0,66 dB	19,0 dB	1,00 dB
2412 MHz	RE11DP	17,1 dB	0,25 dB	21,5 dB	0,22 dB
2437 MHz	RE11DP	16,9 dB	0,36 dB	18,0 dB	0,21 dB
2462 MHz	RE11DP	16,5 dB	0,47 dB	16,4 dB	0,45 dB
5150 MHz	HG2458-09P	15,7 dB	0,67 dB	24,5 dB	0,46 dB
5350 MHz	HG2458-09P	18,4 dB	0,96 dB	20,2 dB	0,52 dB
5470 MHz	HG2458-09P	15,7 dB	1,36 dB	9,1 dB	0,43 dB
5725 MHz	HG2458-09P	9,1 dB	0,83 dB	6,5 dB	0,46 dB
5850 MHz	HG2458-09P	5,4 dB	1,07 dB	13,1 dB	1,12 dB

Fonte: Elaboração própria.

5.1.2. Bloco cerâmico estrutural - largura 14 cm

O gráfico 3 mostra as médias a partir do gráfico C.2 no Apêndice (C), para todas as frequências coletadas; resultado das 30 coletas de dados para parede construída de blocos de cerâmica estrutural. A vedação de interesse deste material é aproximadamente 14 centímetros de largura quando utilizado sem o revestimento da parede (chapisco, emboço e reboco).

Gráfico 3. Médias de atenuações para blocos cerâmico estrutural com largura de 14 cm.



Fonte: Elaboração própria.

No gráfico 3, pode-se observar que na frequência de 5850 MHz, o ensaio apresentou valores muito discrepantes na polarização inversa das antenas, com uma diferença entre as medidas de aproximadamente 16 dB. Deste modo, sugere-se que o valor não deva ser considerado para ser utilizado como referência.

A tabela 14 mostra os valores coletados para cada frequência, as antenas utilizadas para a coleta do sinal, a medida com as antenas na horizontal e na vertical, além do desvio padrão do valor obtidos das amostras coletadas.

Tabela 14. Resultado de atenuações para blocos cerâmico estrutural.

Frequência	Antena	dB			
		dB média Horizontal	desvio (H) padrão(dB)	dB média Vertical	desvio (V) padrão(dB)
915 MHz	HG908P	15,5 dB	0,30 dB	10,4 dB	0,52 dB
1920 MHz	RE11DP	16,8 dB	0,14 dB	12,3 dB	0,17 dB
2412 MHz	RE11DP	12,7 dB	0,21 dB	18,3 dB	0,19 dB
2437 MHz	RE11DP	17,3 dB	0,89 dB	16,7 dB	0,38 dB
2462 MHz	RE11DP	14,1 dB	0,25 dB	18,3 dB	0,12 dB
5150 MHz	HG2458-09P	20,9 dB	1,20 dB	29,7 dB	1,36 dB
5350 MHz	HG2458-09P	16,5 dB	0,40 dB	27,4 dB	1,29 dB
5470 MHz	HG2458-09P	20,8 dB	1,41 dB	24,9 dB	1,40 dB
5725 MHz	HG2458-09P	14,3 dB	1,00 dB	16,4 dB	1,06 dB
5850 MHz	HG2458-09P	4,7 dB	0,52 dB	21,3 dB	1,81 dB

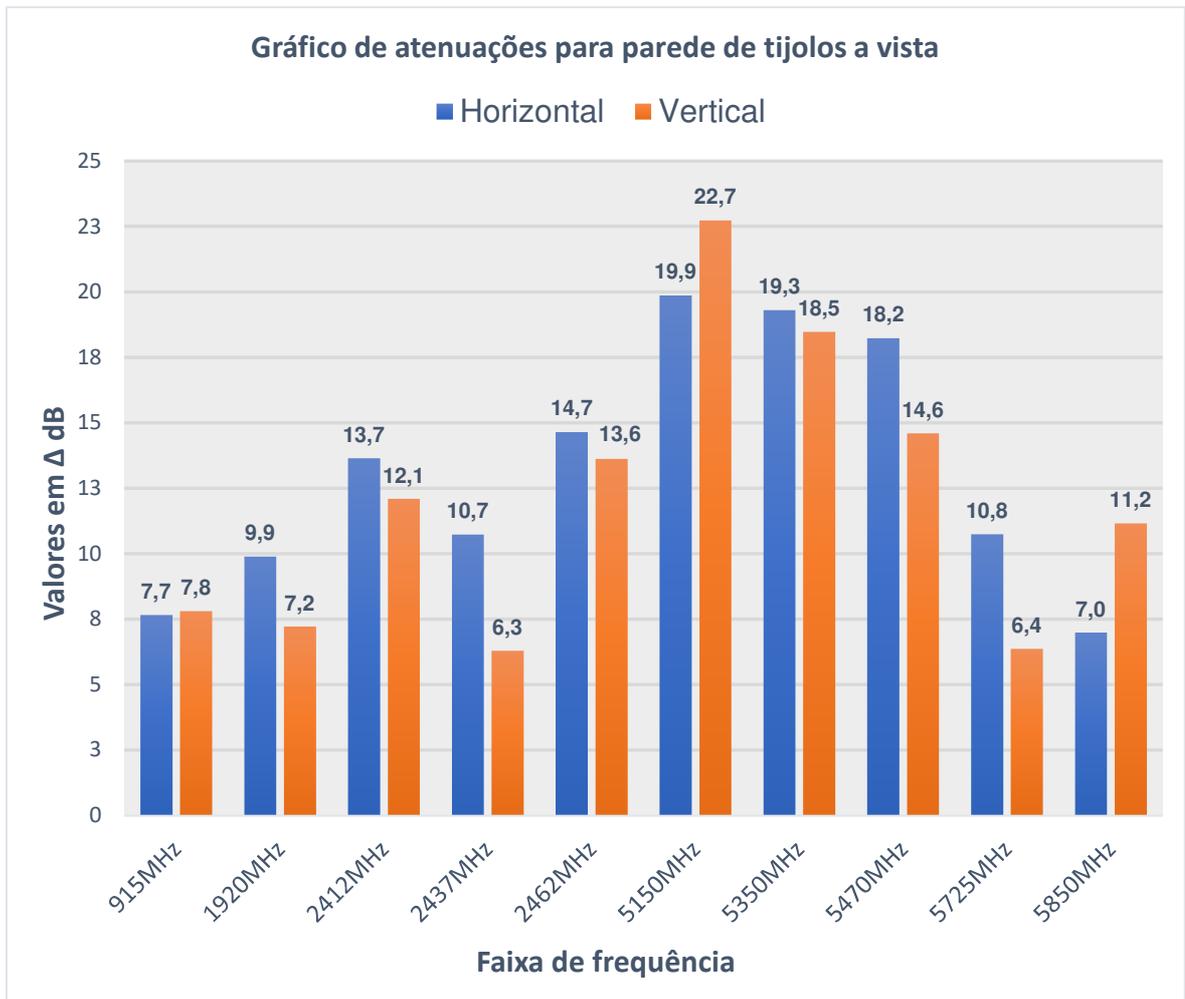
Fonte: Elaboração própria.

5.1.3. Tijolo comum com assentamento tipo à vista - largura de 9 cm.

O gráfico 4 mostra a média das 30 coletas de dados para parede construída de blocos de tijolos comuns do tipo à vista, com o valor corrigido da perda no espaço livre. A vedação de interesse deste material é aproximadamente 9 centímetros quando utilizado sem o revestimento do reboque.

O número de coletas pode ser visualizado no gráfico C.3 no (Apêndice C), para todas as frequências coletadas.

Gráfico 4. Gráfico de médias de atenuações para tijolos comuns do tipo à vista.



Fonte: Elaboração própria.

A tabela 15 apresenta os valores coletados para cada frequência, as antenas utilizadas para a coleta do sinal, a medida com as antenas na horizontal e na vertical, além do desvio padrão sobre o valor de cada amostra coletada.

Tabela 15. Resultado de atenuações para tijolos comuns do tipo à vista.

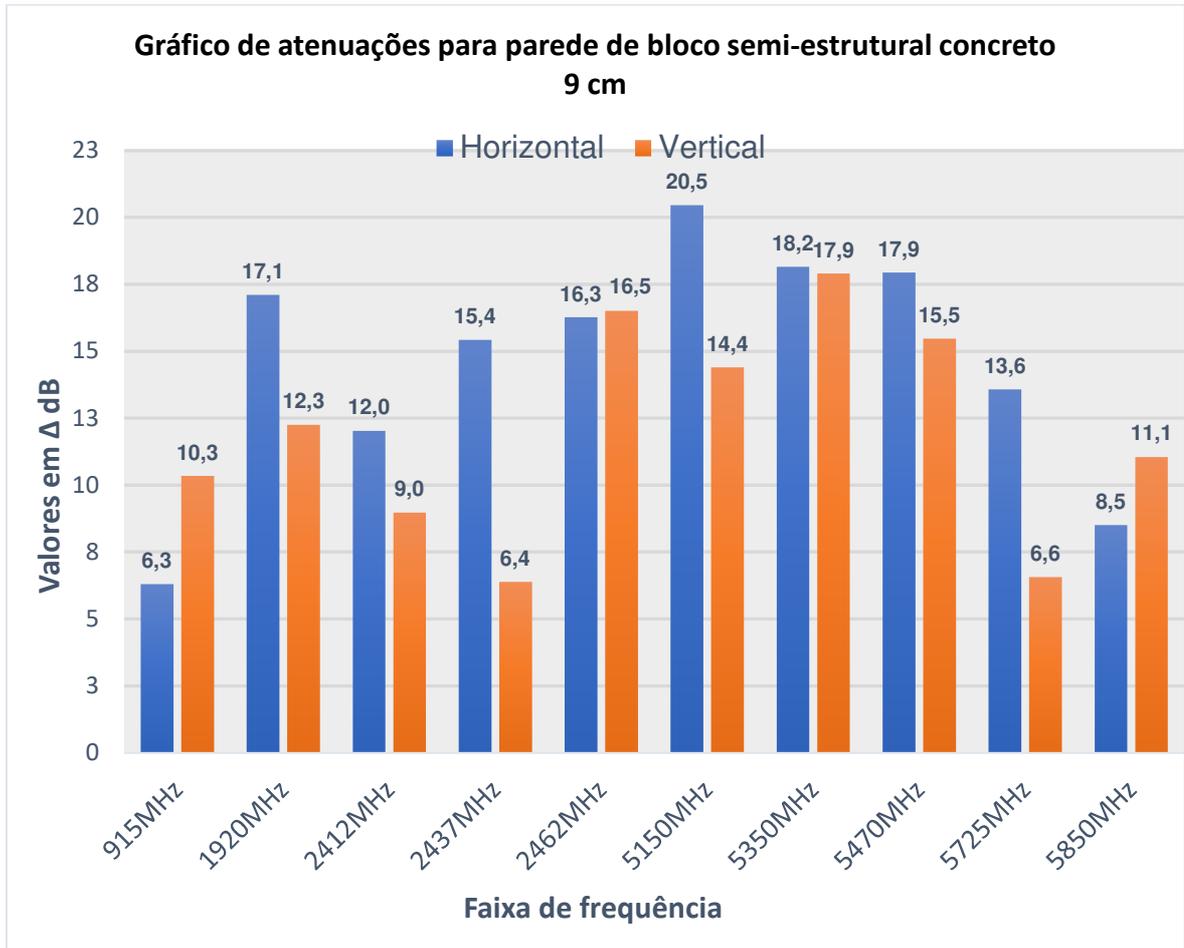
Frequência	Antena	dB média		dB desvio	
		Horizontal	padrão(dB)	média Vertical	(V) padrão(dB)
915 MHz	HG908P	7,7 dB	0,18 dB	7,8 dB	0,71 dB
1920 MHz	RE11DP	9,9 dB	0,15 dB	7,2 dB	0,78 dB
2412 MHz	RE11DP	13,6 dB	0,34 dB	12,1 dB	0,10 dB
2437 MHz	RE11DP	10,7 dB	0,42 dB	6,3 dB	0,17 dB
2462 MHz	RE11DP	14,6 dB	0,26 dB	13,6 dB	0,26 dB
5150 MHz	HG2458-09P	19,8 dB	1,09 dB	22,7 dB	0,59 dB
5350 MHz	HG2458-09P	19,3 dB	1,33 dB	18,4 dB	0,73 dB
5470 MHz	HG2458-09P	18,2 dB	1,30 dB	14,6 dB	1,41 dB
5725 MHz	HG2458-09P	10,7 dB	0,89 dB	6,3 dB	1,24 dB
5850 MHz	HG2458-09P	6,9 dB	0,89 dB	11,1 dB	0,44 dB

Fonte: Elaboração própria.

5.1.4. Bloco de concreto semi-estrutural largura 9 cm

O gráfico 5 mostra as médias de cada grupo de frequência a partir do gráfico C.4 no (Apêndice C), onde os valores estão ajustados da perda no espaço livre.

Gráfico 5. Gráfico de médias de atenuações para bloco semi-estrutural de concreto de 9 cm largura.



Fonte: Elaboração própria.

Nas coletas de dados de atenuação de bloco de concreto semi-estrutural com largura de vedação de 9 cm, verificou-se que os valores nas frequências da faixa de 2400 MHz à 2500 MHz estão alinhadas com os valores sugeridos por outros autores.

A tabela 16 apresenta os valores coletados com as antenas na posição vertical e horizontal, além dos desvios padrão de ambas orientações.

Tabela 16. Resultado de atenuações para blocos de concreto semi-estrutural – 9 cm.

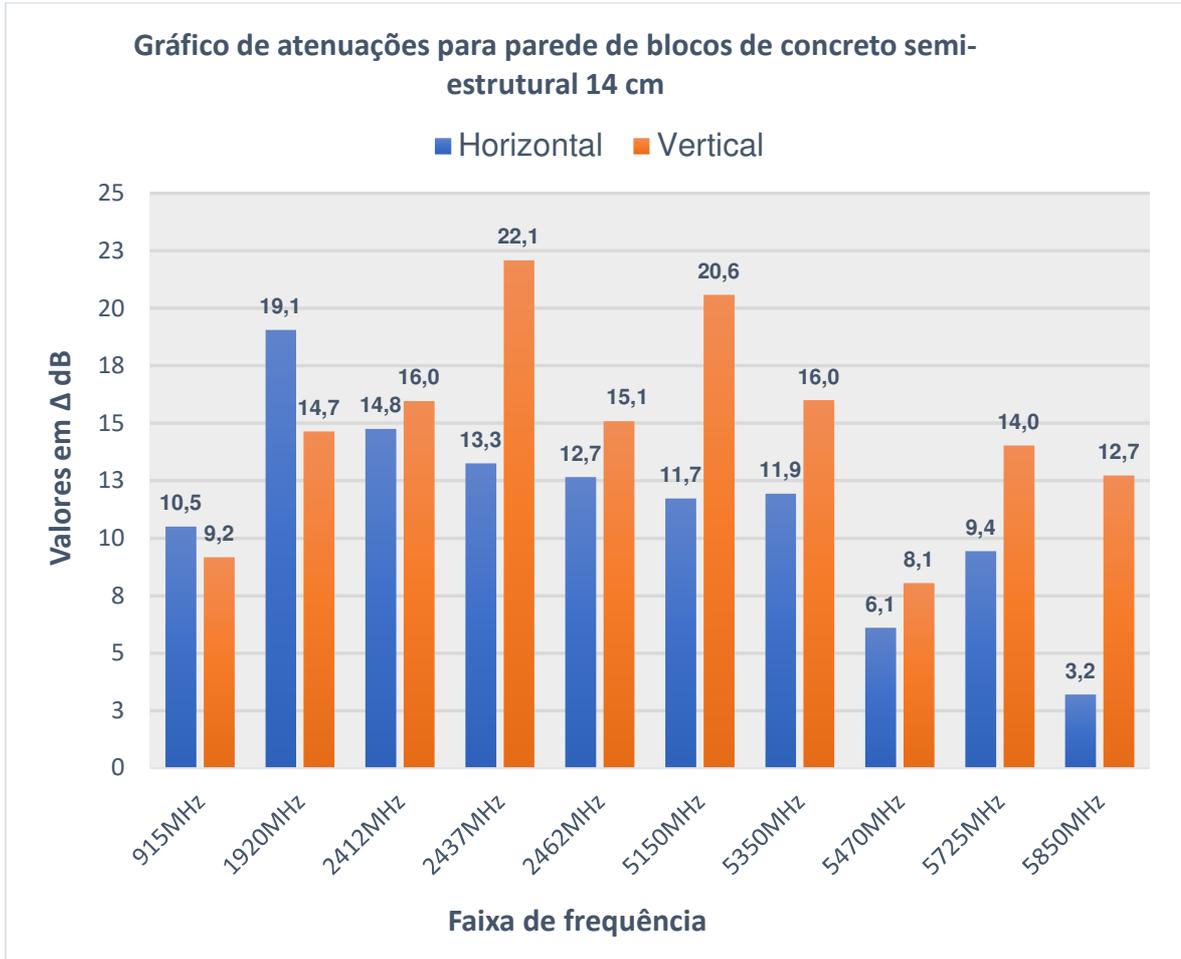
Frequência	Antena	dB média Horizontal	desvio (H) padrão(dB)	dB	
				média Vertical	desvio (V) padrão(dB)
915 MHz	HG908P	6,1 dB	0,17 dB	10,3 dB	0,08 dB
1920 MHz	RE11DP	17,1 dB	1,49 dB	12,2 dB	0,13 dB
2412 MHz	RE11DP	12,0 dB	0,26 dB	8,9 dB	0,05 dB
2437 MHz	RE11DP	15,4 dB	0,25 dB	6,3 dB	0,04 dB
2462 MHz	RE11DP	16,2 dB	0,34 dB	16,5 dB	0,11 dB
5150 MHz	HG2458-09P	20,4 dB	1,12 dB	14,4 dB	0,33 dB
5350 MHz	HG2458-09P	18,1 dB	0,89 dB	17,9 dB	0,61 dB
5470 MHz	HG2458-09P	17,9 dB	0,87 dB	15,5 dB	0,81 dB
5725 MHz	HG2458-09P	13,6 dB	1,21 dB	6,5 dB	0,97 dB
5850 MHz	HG2458-09P	8,5 dB	0,97 dB	11,0 dB	1,03 dB

Fonte: Elaboração própria.

5.1.5. Bloco de concreto semi-estrutural largura 14 cm

O gráfico 6 mostra as médias de cada grupo de frequência a partir do gráfico C.5 no (Apêndice C), onde os valores estão ajustados da perda no espaço livre.

Gráfico 6. Médias de atenuações para bloco semi-estrutural de concreto de 14 cm largura.



Fonte: Elaboração própria.

A tabela 17 apresenta os valores para os blocos de concreto semi-estrutural – 14 cm.

Tabela 17. Resultado de atenuações para blocos de concreto semi-estrutural.

Frequência	Antena	dB média		dB	
		Horizontal	desvio (H) padrão(dB)	média Vertical	desvio (V) padrão(dB)
915 MHz	HG908P	10,5 dB	0,25 dB	9,2 dB	0,29 dB
1920 MHz	RE11DP	19,1 dB	0,30 dB	14,6 dB	0,18 dB
2412 MHz	RE11DP	14,7 dB	0,25 dB	15,9 dB	0,22 dB
2437 MHz	RE11DP	13,2 dB	0,16 dB	21,7 dB	0,21 dB
2462 MHz	RE11DP	12,6 dB	0,20 dB	14,9 dB	0,09 dB
5150 MHz	HG2458-09P	11,7 dB	0,40 dB	21,8 dB	0,94 dB
5350 MHz	HG2458-09P	11,9 dB	0,25 dB	16,0 dB	0,48 dB
5470 MHz	HG2458-09P	6,1 dB	0,27 dB	8,0 dB	0,40 dB
5725 MHz	HG2458-09P	9,4 dB	0,82 dB	12,3 dB	1,41 dB
5850 MHz	HG2458-09P	3,2 dB	0,98 dB	12,4 dB	0,25 dB

Fonte: Elaboração própria.

A tabela 18 apresenta os valores de atenuações em dB coletados dos materiais construtivos com a correção do valor medido em ambiente controlado.

Tabela 18. Relação de atenuações dos materiais construtivos.

Frequência	Tijolos cerâmico não estrutural 6 furos	Tijolos comuns à vista	Tijolos cerâmico estrutural 14 cm	Blocos semi- estrutural de concreto 9 cm	Blocos semi- estrutural de concreto 14 cm
915 MHz	7,2 dB	7,6 dB	15,5 dB	6,1 dB	10,5 dB
1920 MHz	24,8 dB	9,9 dB	16,8 dB	17,1 dB	19,1 dB
2412 MHz	17,1 dB	13,6 dB	12,7 dB	12,0 dB	14,7 dB
2437 MHz	16,9 dB	10,7 dB	17,3 dB	15,4 dB	13,2 dB
2462 MHz	16,5 dB	14,6 dB	14,1 dB	16,2 dB	12,6 dB
5150 MHz	15,7 dB	19,8 dB	20,9 dB	20,4 dB	11,7 dB
5350 MHz	18,4 dB	19,3 dB	16,5 dB	18,1 dB	11,9 dB
5470 MHz	15,7 dB	18,2 dB	20,8 dB	17,9 dB	6,1 dB
5725 MHz	9,1 dB	10,7 dB	14,3 dB	13,6 dB	9,4 dB
5850 MHz	5,4 dB	6,9 dB	4,7 dB	8,5 dB	3,2 dB

Fonte: Elaboração própria.

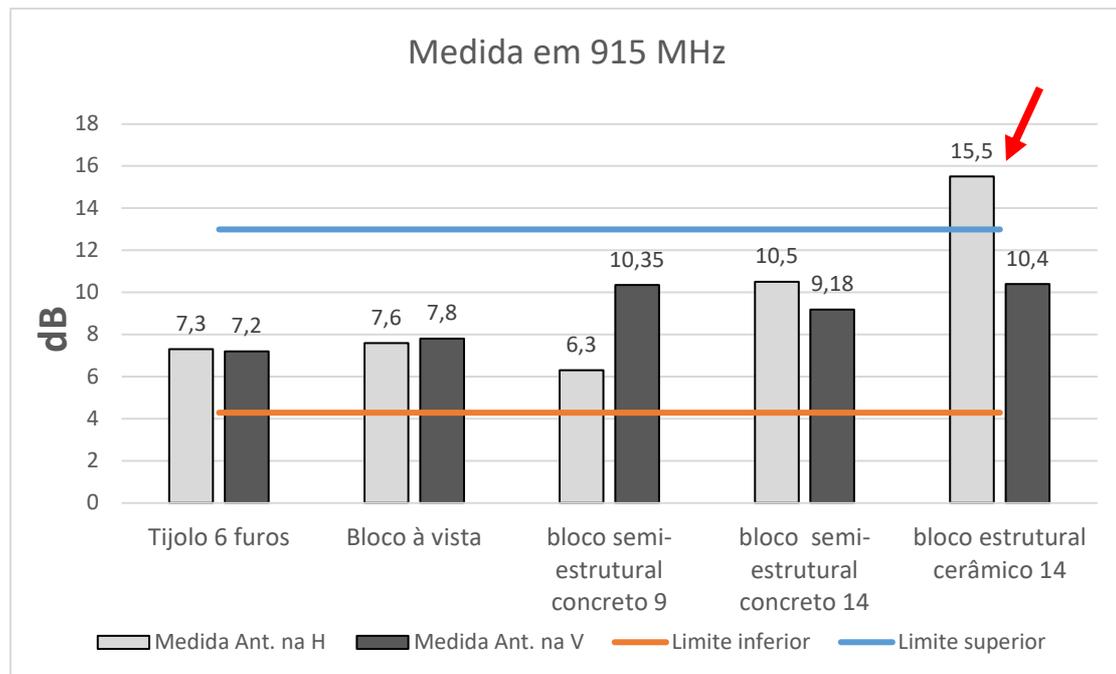
Os valores coletados permitirão avanços na gestão dos materiais encontrados em plantas industriais e comerciais, para predição de áreas de cobertura em ambientes *indoor*, permitindo a detecção antecipada dos recursos necessários para promover a cobertura do ambiente, determinando excessos de fontes transmissoras e prevenção de áreas de sombras.

5.2. Valores de Atenuação na literatura para as frequências medidas

Conforme os valores apresentados no gráfico 7, gráfico 8, gráfico 9, gráfico 10, gráfico 11 e gráfico 12, para as frequências de 915 MHz à 5800 MHz, é possível observar que em alguns materiais construtivos medidos a atenuação

coletada ficou com valores de atenuações menores do que o limite inferior, sendo que em outros casos ultrapassou os valores medidos como encontrados na literatura (TORNEVIK, 1993), (DOBKIN, 2005), (AVAYA, [s.d.]) e (MICHELI et al. 2015).

Gráfico 7. Medidas em 915 MHz, com os limites de atenuações superiores e inferiores.

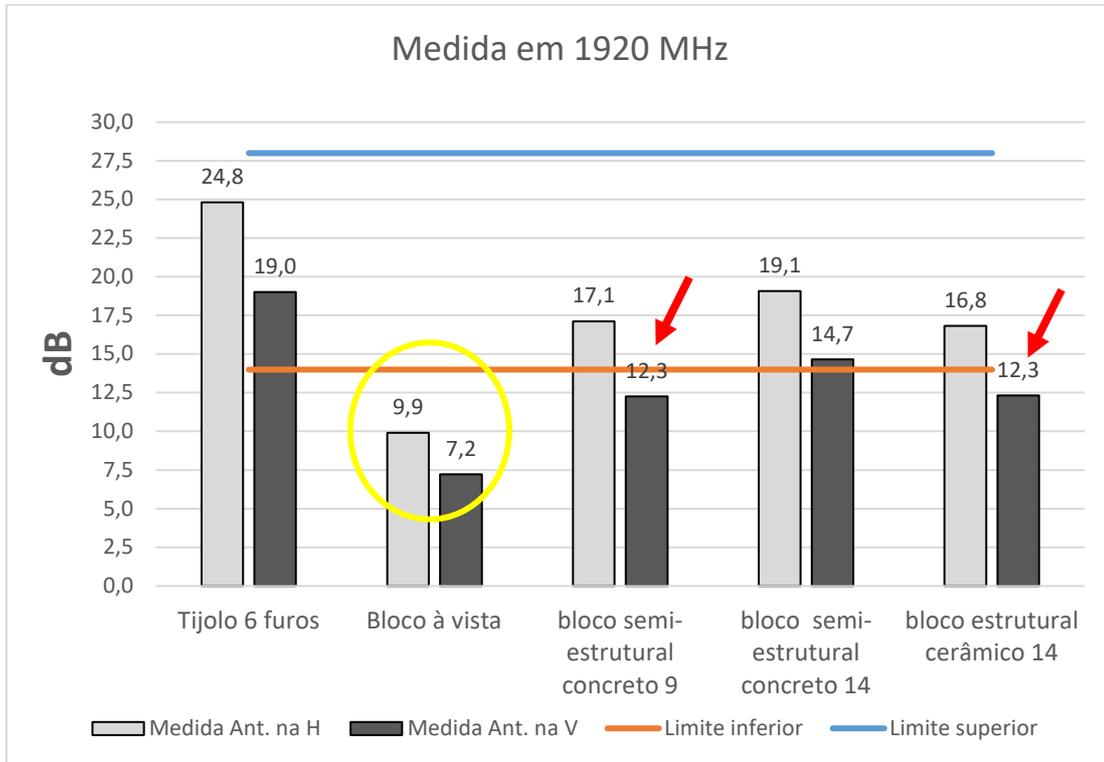


Fonte: Elaboração própria.

Os limites inferiores e superiores nomeados pelo autor nos gráficos 7, gráfico 8, gráfico 9, gráfico 10, gráfico 11 e gráfico 12, ilustram os valores medidos por outros autores encontrados durante a revisão bibliográfica, eles servem de referência para as atenuações coletadas. Estes valores são classificados por frequência, atenuação e o tipo de material construtivo.

No gráfico 7, como pode ser observado, o tipo de material construtivo bloco estrutural cerâmico com 14 cm de largura de vedação, os valores medidos estão 2 dB acima dos limites superiores de 13 dB encontrados na literatura para esta frequência.

Gráfico 8. Medidas em 1920 MHz, com os limites de atenuações superiores e inferiores para as frequências na pesquisa.

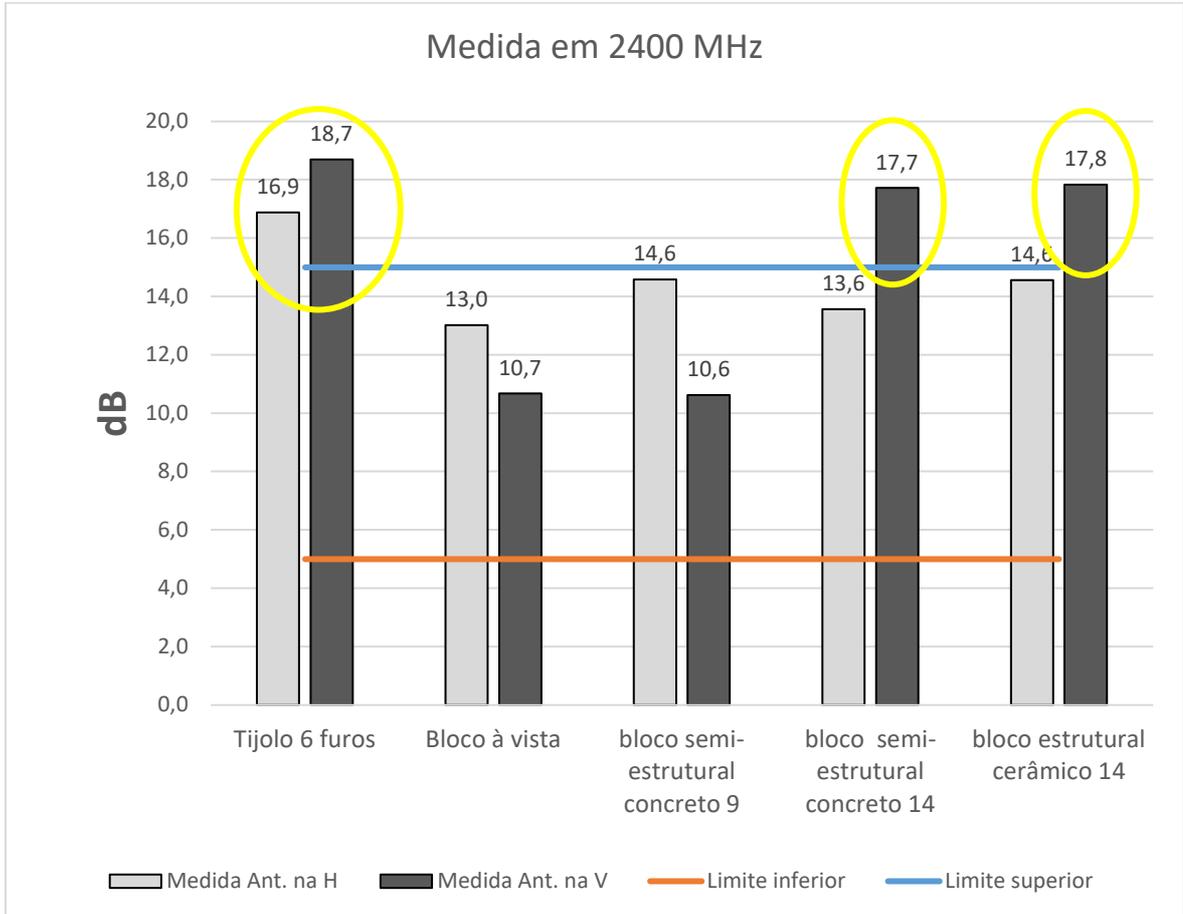


Fonte: Elaboração própria.

Como pode ser observado no gráfico 8, apenas o material construtivo bloco à vista desempenhou atenuações abaixo dos limites encontrados na literatura para esta frequência entre 14 dB à 28 dB.

No gráfico 9, na frequência de 2400 MHz a maior parte dos materiais construtivos medidos apresentaram valores de atenuações acima dos limites encontrados por (DOBKIN, 2005), ou seja, entre 5 dB à 15 dB.

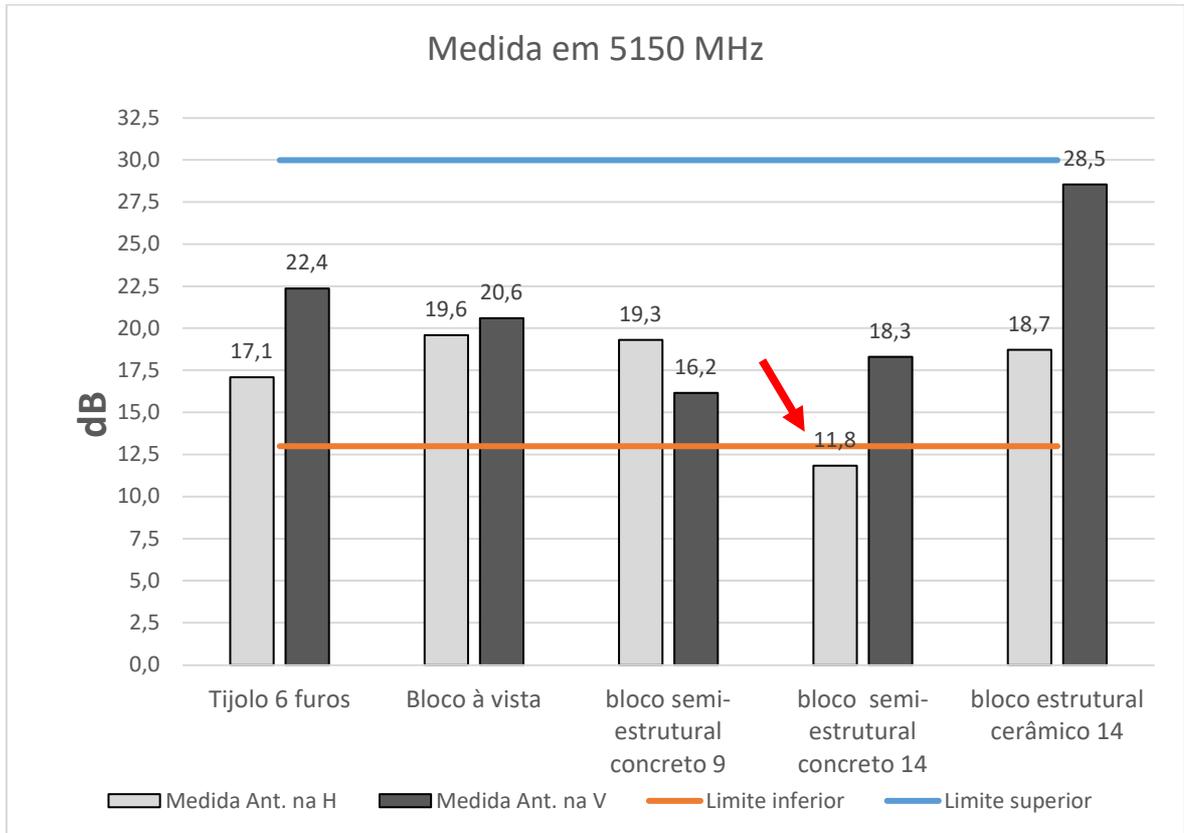
Gráfico 9. Medidas em 2400 MHz, com os limites de atenuações superiores e inferiores para as frequências na pesquisa.



Fonte: Elaboração própria.

Como pode ser observado no gráfico 10, a maioria dos materiais construtivos apresentaram atenuações entre os limites encontrados na literatura de 13 dB à 30 dB para esta frequência.

Gráfico 10. Medidas em 5150 MHz, com os limites de atenuações superiores e inferiores para as frequências na pesquisa.

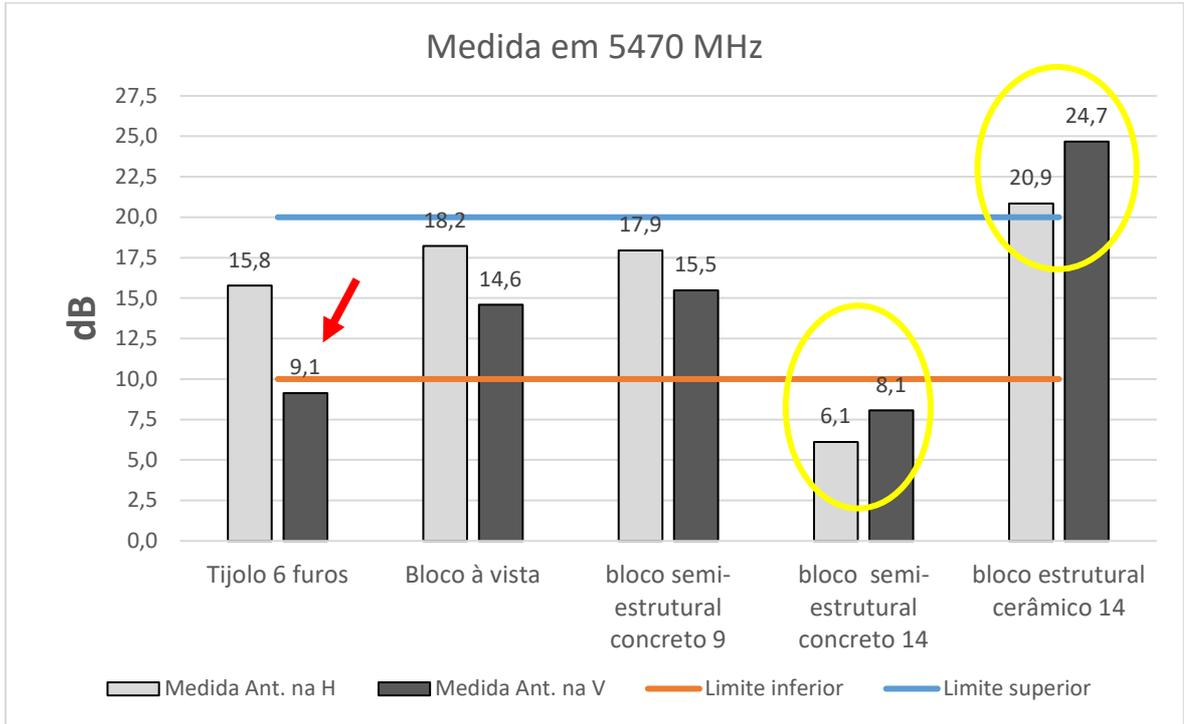


Fonte: Elaboração própria.

Como pode ser observado no gráfico 11, o material construtivo bloco semi-estrutural de concreto com 14 cm de largura de vedação apresentou atenuações abaixo do limite inferior entre 10 dB, já para amostra de bloco estrutural cerâmico com 14 cm de largura de vedação desempenhou atenuações acima do limite superior de 20 dB para esta frequência.

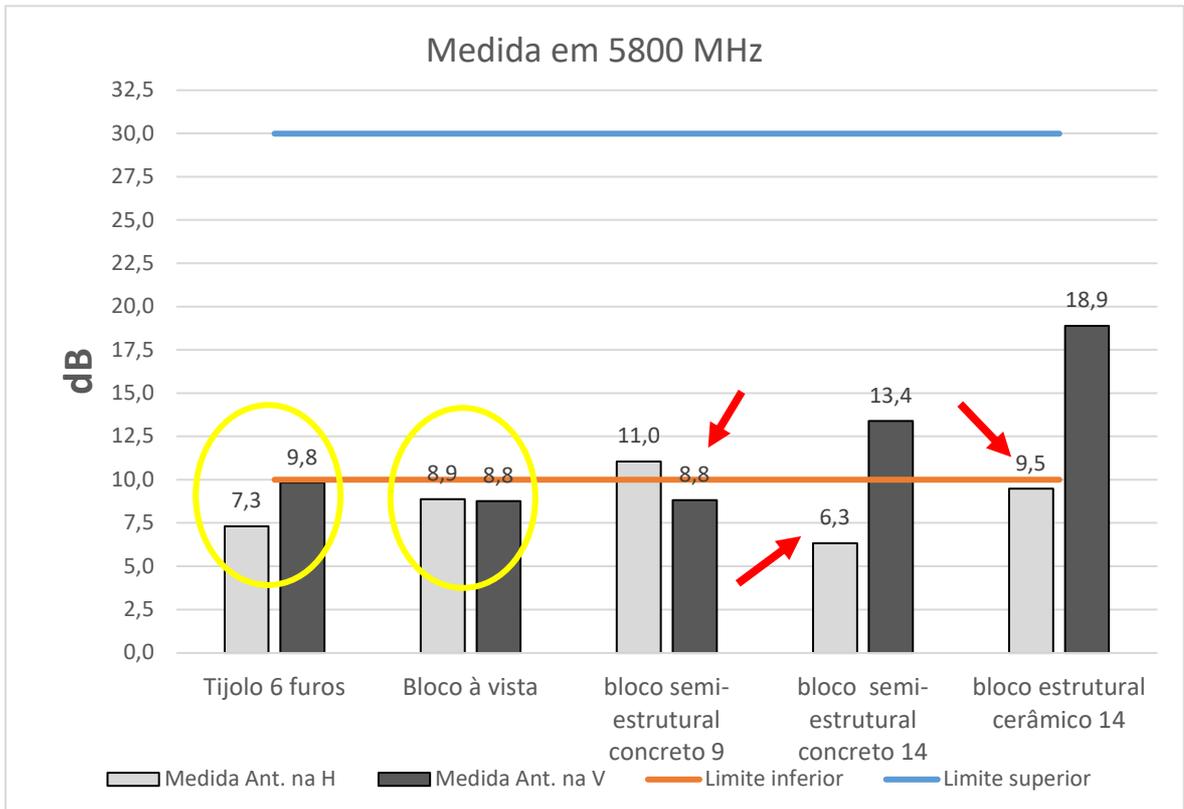
No gráfico 12, a maior parte dos materiais construtivos medidos apresentaram valores de atenuações abaixo dos limites inferiores entre 10 dB à 30 dB.

Gráfico 11. Medidas em 5470 MHz, com os limites de atenuações superiores e inferiores para as frequências na pesquisa.



Fonte: Elaboração própria.

Gráfico 12. Medidas em 5800 MHz, com os limites de atenuações superiores e inferiores para as frequências na pesquisa.



Fonte: Elaboração própria.

5.3. Comparação da atenuação (Base de dados Software x Atenuação medida)

A ferramenta de *software* IProp foi utilizada para demonstrar a variação de cobertura de sinal utilizando os dados coletados. Desenvolvido por PAVEL PECHAC, utiliza dois modelos de propagação *one-slope* e *mult-wall*. Além disso, utilizando o mesmo método de predição de outros softwares de predição Wi-Fi, o modelo desenvolvido por PECHAC permite utilizar frequências mais baixas, além de inserir fatores de correções.

Para uma melhor compreensão dos resultados obtidos a partir da coleta de atenuação do sinal, medida na passagem sobre o material estudado, os valores foram inseridos no software de predição, utilizando a frequência de interesse com a perda por atenuação padrão informada por recomendações e estudos anteriores, sendo então comparados com os novos valores coletados neste trabalho.

O material utilizado para avaliar o fator de perda por atenuação foi o tipo de alvenaria de blocos cerâmico estrutural. Para cada frequência de trabalho, realizou-se a medida com valores padrões disponíveis nos softwares de predição. Em seguida, apresentou-se a mesma cobertura de sinal com valores de paredes ajustadas a partir de atenuações coletas das medidas.

Neste ambiente, foi possível visualizar o aumento da atenuação quando aplicado a uma planta exemplo.

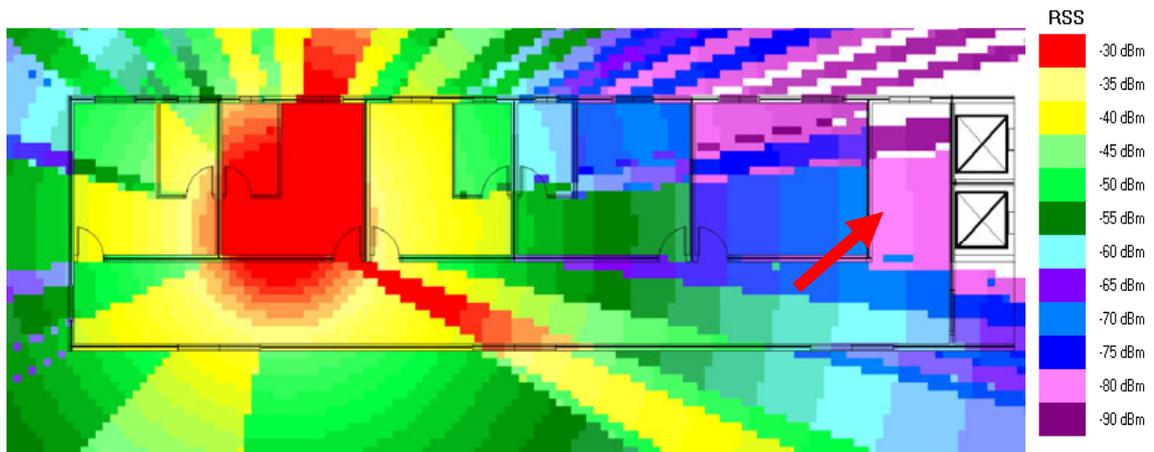
Em todas as plantas utilizadas para mostrar o comportamento da perda de sinal, a fonte de transmissão foi posicionada na mesma localização na planta e com fator de potência de 17 dBm para propagação de sinal.

5.3.1. Predição de cobertura de sinal utilizando a base de atenuação de blocos de cerâmica estrutural.

5.3.1.1. Frequência de 915 MHz – Predição em paredes de bloco cerâmico estrutural.

Na figura 44, é mostrada a cobertura de sinal com a inserção de vedação de paredes na planta utilizando os valores de perda por atenuação da ordem de 10 dB. Na imagem, é possível ver que o menor sinal predito está próximo da seta.

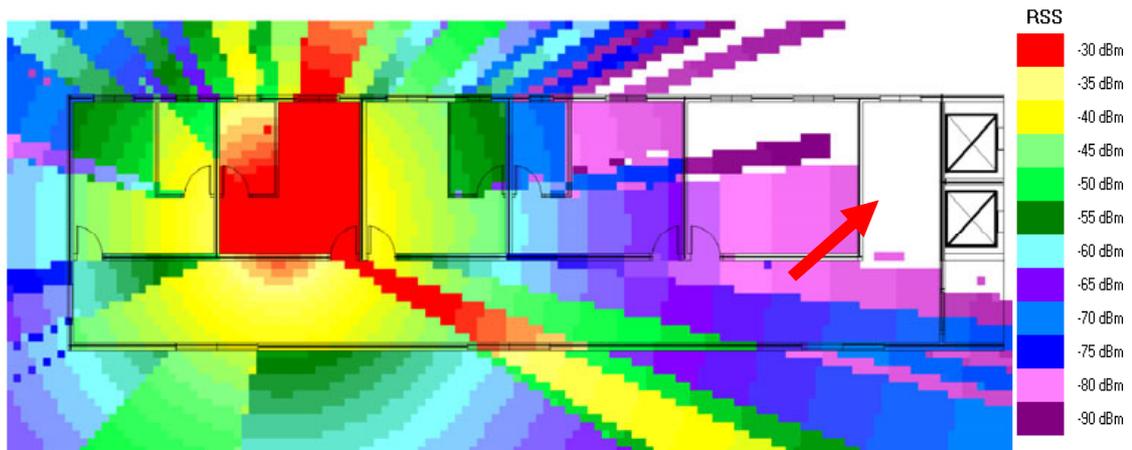
Figura 44. Predição de cobertura utilizando valores para 915 MHz, 10 dB de atenuação, padrão encontrado no software de predição.



Fonte: Elaboração própria.

Como pode ser observado na figura 45, foram realizadas as predições com os valores de atenuação de parede com 15 dB, e utilizando estas configurações de perda obteve-se uma cobertura de sinal menor em propagação em relação ao modelo sugerido no software de predição, porém os valores que foram medidos estão 2 dB acima dos limites encontrados na literatura entre 5 dB à 13 dB para esta frequência.

Figura 45. Predição de cobertura de sinal utilizando valores para 915 MHz, 15 dB de perda.



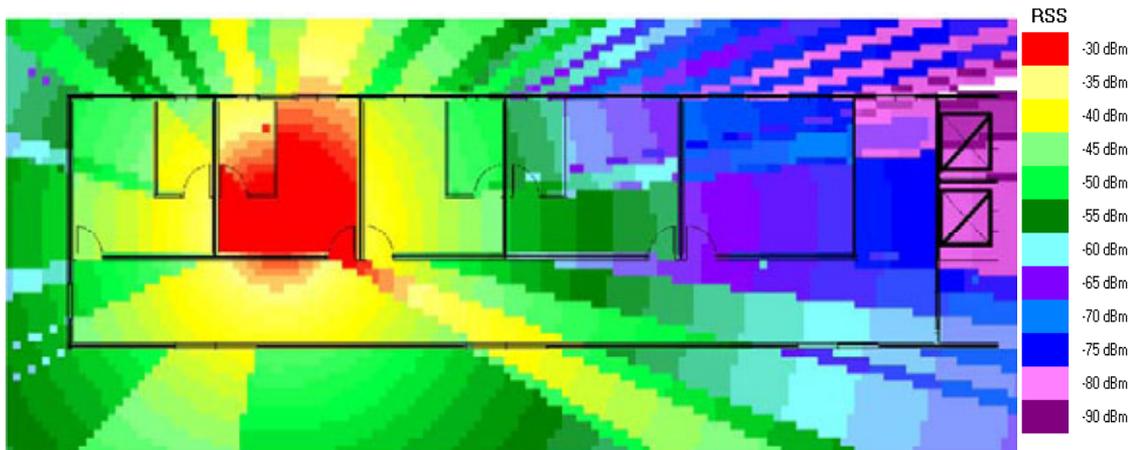
Fonte: Elaboração própria.

Na figura 45, é mostrada a cobertura de sinal com a inserção do parâmetro de atenuação de paredes na planta utilizando os valores de 15 dB de perda por atenuação, conforme coletado neste trabalho. Neste caso, observa-se que a área destacada na imagem apresenta uma cobertura menor em relação a figura 44, ou seja, uma previsão menor de atendimento do sinal de um transmissor. Com este resultado, é possível determinar pela necessidade de um maior número de transmissores para atender as exigências técnicas de um projeto de redes sensores sem fio.

5.3.1.2. Frequência de 1920 MHz – Predição em paredes de bloco cerâmico estrutural.

Na figura 46, é mostrada a cobertura de sinal com a inserção de vedação de paredes na planta utilizando os valores de perda por atenuação da ordem de 10 dB para a frequência de 1920 MHz.

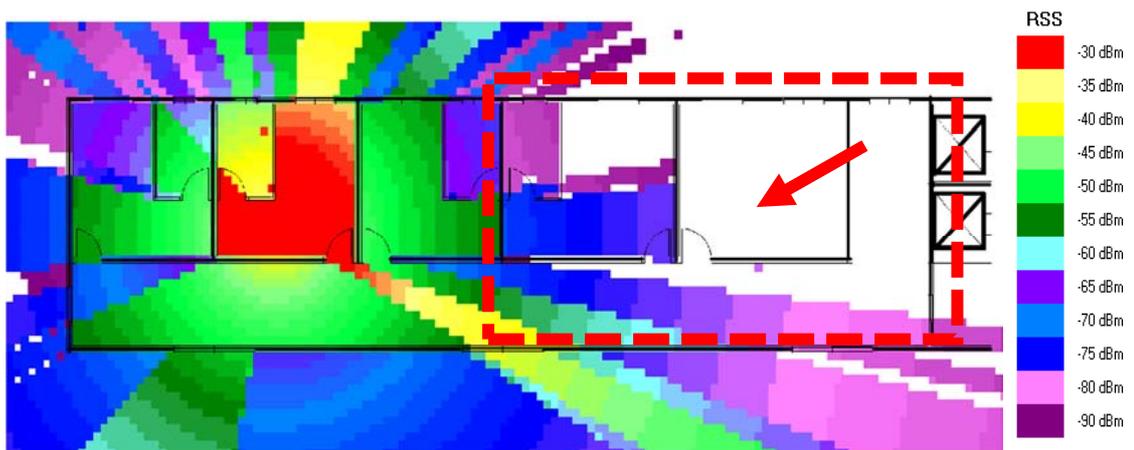
Figura 46. Predição de cobertura de sinal utilizando valores para 1920 MHz, 10 dB de atenuação, padrão encontrado no software de predição.



Fonte: Elaboração própria.

Como pode ser observado na figura 47, utilizando os valores medidos de 17 dB conforme o gráfico 8. para paredes de blocos de cerâmica estrutural de 14,4 cm de largura de vedação; com estas configurações de perda obteve-se uma cobertura de sinal menor em propagação em relação ao modelo sugerido no software de predição, porém os valores que foram medidos estão dentro dos limites encontrados na literatura entre 14 dB à 28 dB para esta frequência de transmissão.

Figura 47. Predição de cobertura de sinal utilizando valores para 1920 MHz, 17 dB de perda.

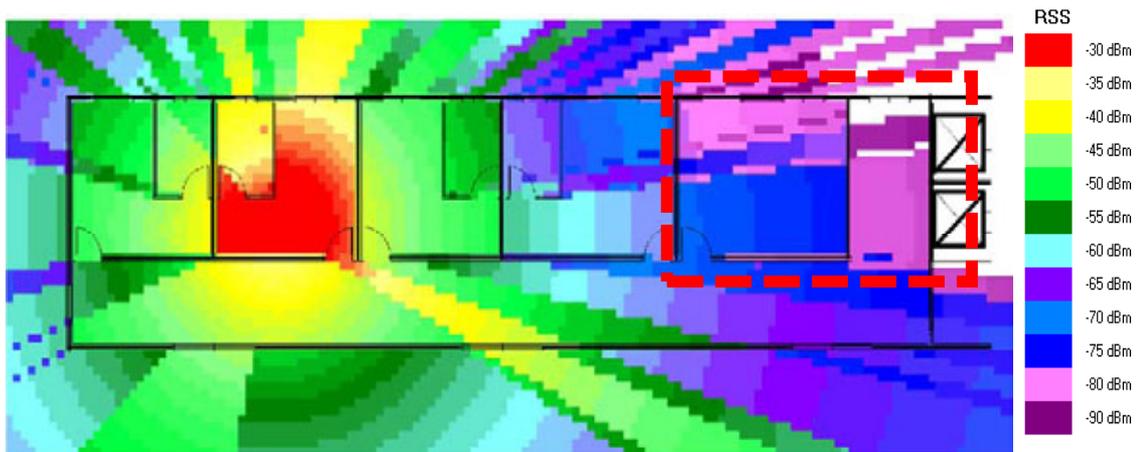


Fonte: Elaboração própria.

5.3.1.3. Frequência de 2400 MHz – Predição em paredes de bloco cerâmico estrutural.

Na figura 48, a seguir, é mostrada a cobertura de sinal com a inserção de vedação de paredes na planta utilizando os valores de perda por atenuação da ordem de 10 dB para a frequência de 2400 MHz.

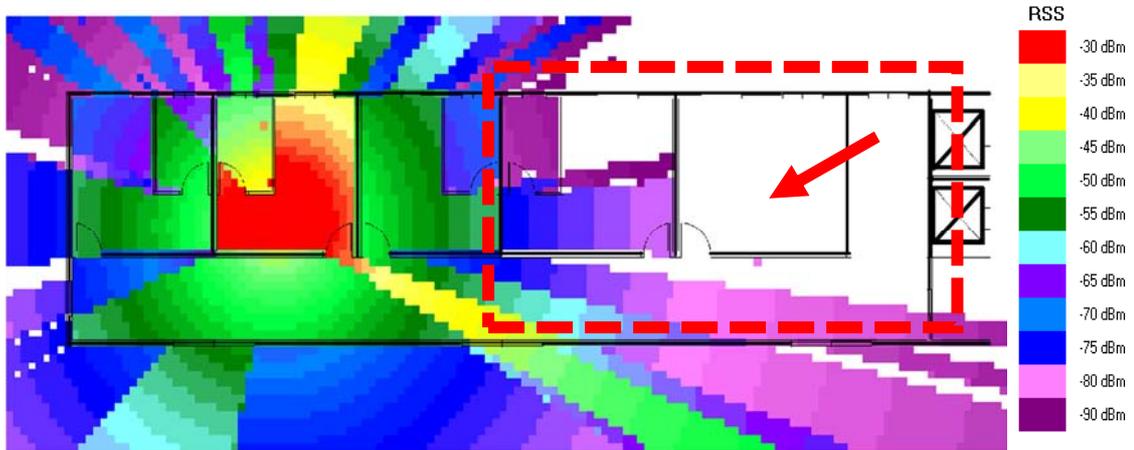
Figura 48. Predição de cobertura de sinal utilizando valores para 2400 MHz, 10 dB de atenuação, padrão encontrado no software de predição.



Fonte: Elaboração própria.

Como pode ser observado na figura 49, utilizando os valores medidos de 17 dB para paredes de blocos de cerâmica estrutural de 14,4 cm de largura de vedação na frequência em *Wi-Fi*, faixa de 2400 MHz; com as configurações de perda inseridas nas paredes obtiveram uma cobertura de sinal menor em propagação em relação ao modelo sugerido no software de predição, entretanto os valores estão acima dos limites encontrados na literatura entre 5 dB à 15 dB para esta frequência de transmissão. Com este resultado, haveria uma necessidade maior no número de fontes de transmissão, reduzindo áreas de sombra causadas com a predição de cobertura gerada a partir de valores de atenuação de paredes menores. Além disso, haveria melhor aproveitamento dos canais de rádio e menor interferência.

Figura 49. Predição de cobertura de sinal utilizando valores para 2400 MHz, 17 dB de perda por atenuação.

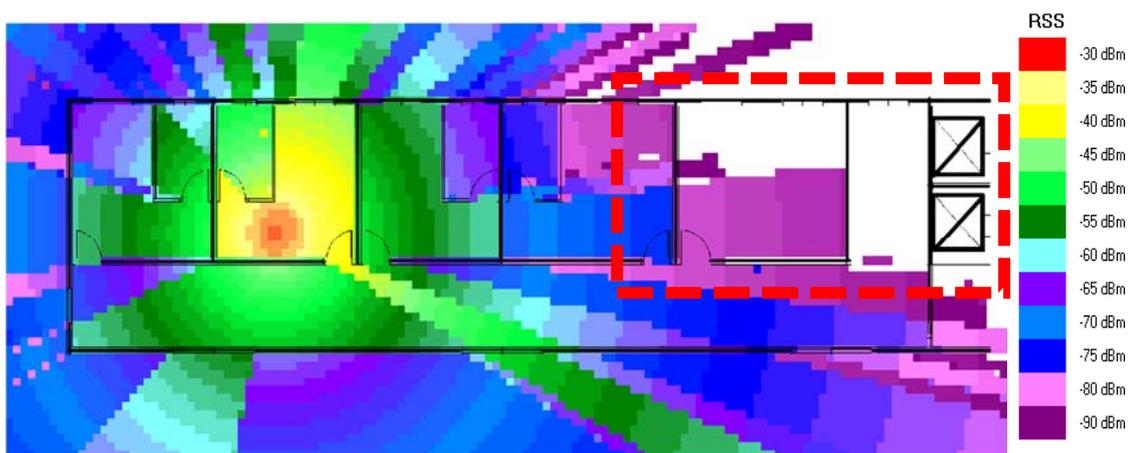


Fonte: Elaboração própria.

5.3.1.4. Frequência de 5150-5350 MHz – Predição em paredes de bloco cerâmico estrutural.

Na figura 50, é mostrada a cobertura de sinal com a inserção de vedação de paredes na planta utilizando os valores de perda por atenuação padronizados nos *softwares* de predição para paredes de tijolos em cerâmica de 10 dB para a frequência de 5150-5350 MHz, a frequência utilizada é primeira faixa de utilização de canalização em 5 GHz padrão *WLAN*.

Figura 50. Predição de cobertura de sinal utilizando valores para 5150-5350 MHz, 10 dB de perda por atenuação, padrão encontrado no software de predição.

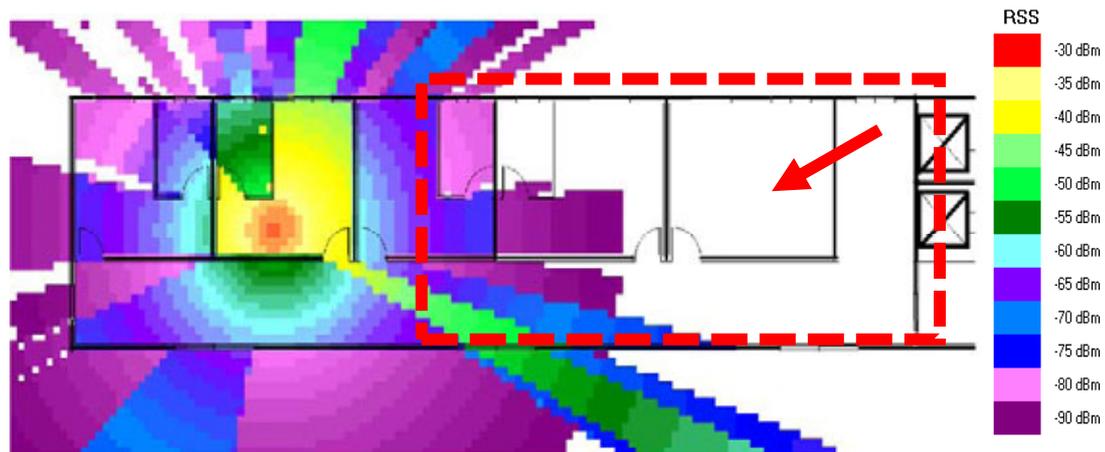


Fonte: Elaboração própria.

Como pode ser observado na figura 51, utilizando os valores medidos de 19 dB para paredes de blocos de cerâmica estrutural de 14,4 cm de largura de vedação na frequência em *Wi-Fi*, faixa de 5150 MHz, com as configurações de

perda inseridas nas paredes obteve-se uma cobertura de sinal menor em propagação em relação ao modelo sugerido no software de predição. Entretanto, os valores estão dentro dos limites encontrados na literatura entre 13 dB à 30 dB para esta frequência de transmissão em redes *WLAN* em 5 GHz.

Figura 51. Predição de cobertura de sinal utilizando valores para 5150-5350 MHz, 19 dB de perda por atenuação.

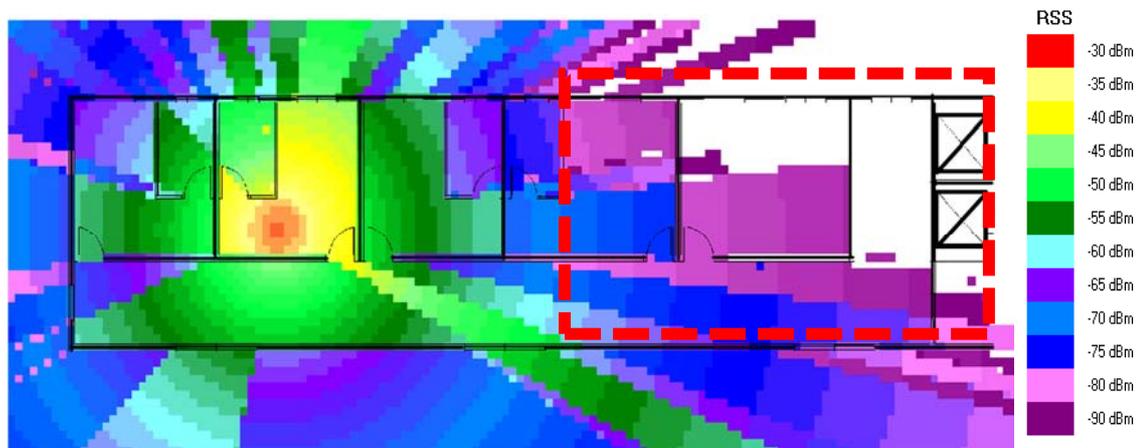


Fonte: Elaboração própria.

5.3.1.5. Frequência de 5470 MHz – Predição em paredes de bloco cerâmico estrutural.

Na figura 52, é mostrada a cobertura de sinal com a inserção de vedação de paredes na planta utilizando os valores de perda por atenuação padronizados nos softwares de predição para paredes de tijolos em cerâmica de 10 dB para a frequência de 5350 MHz, a frequência utilizada no fim da segunda faixa de utilização de canalização em 5 GHz UNII-2 “*Unlicensed National Information Infrastructure*” no padrão 802.11 IEEE.

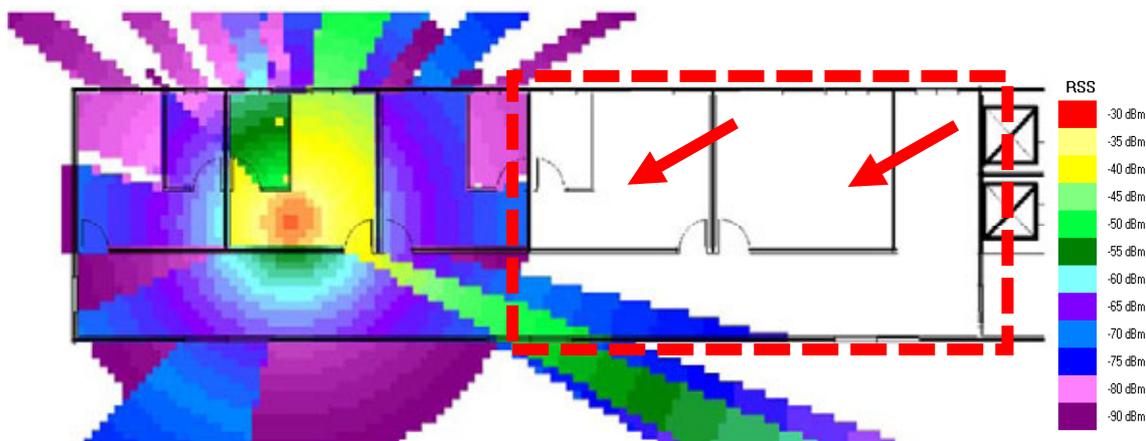
Figura 52. Predição de cobertura de sinal utilizando valores para 5470 MHz, 10 dB de perda por atenuação, padrão encontrado no software de predição.



Fonte: Elaboração própria.

Como pode ser observado na figura 53, utilizando os valores medidos de 21 dB para paredes de blocos de cerâmica estrutural de 14,4 cm de largura de vedação na frequência em *Wi-Fi*, faixa de 5470 MHz, com as configurações de perda inseridas nas paredes se obteve uma cobertura de sinal menor em propagação em relação ao modelo sugerido no software de predição. Entretanto, os valores estão dentro dos limites encontrados na literatura entre 10 dB à 20 dB para esta frequência de transmissão em redes *WLAN* em 5 GHz.

Figura 53. Predição de cobertura de sinal utilizando valores para 5470 MHz, 21 dB de perda por atenuação.

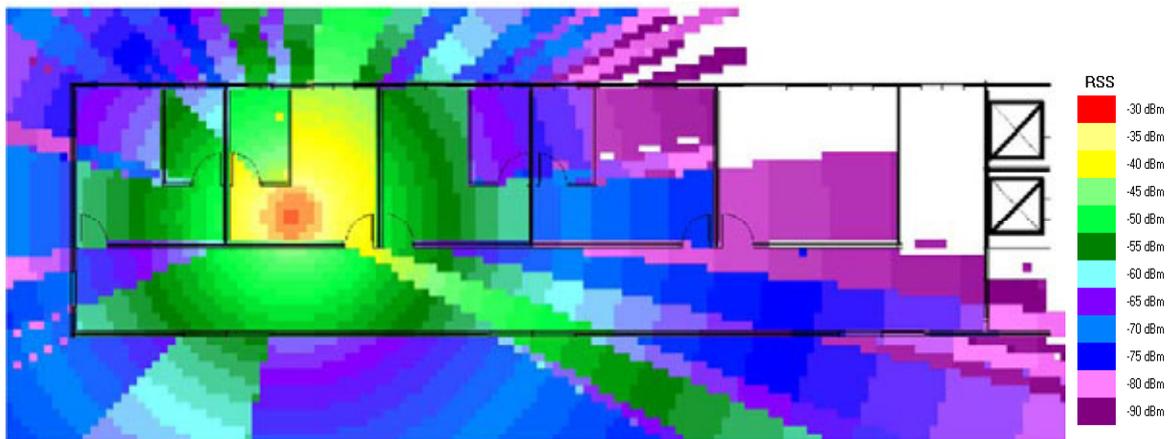


Fonte: Elaboração própria.

5.3.1.6. Frequência de 5800 MHz – Predição em paredes de bloco cerâmico estrutural.

Na figura 54, foi utilizado o valor de 10 dB para o preenchimento de parede de alvenaria em cerâmica no *layout* inserido no *software* de predição, a simulação é realizada para a frequência de 5800 MHz.

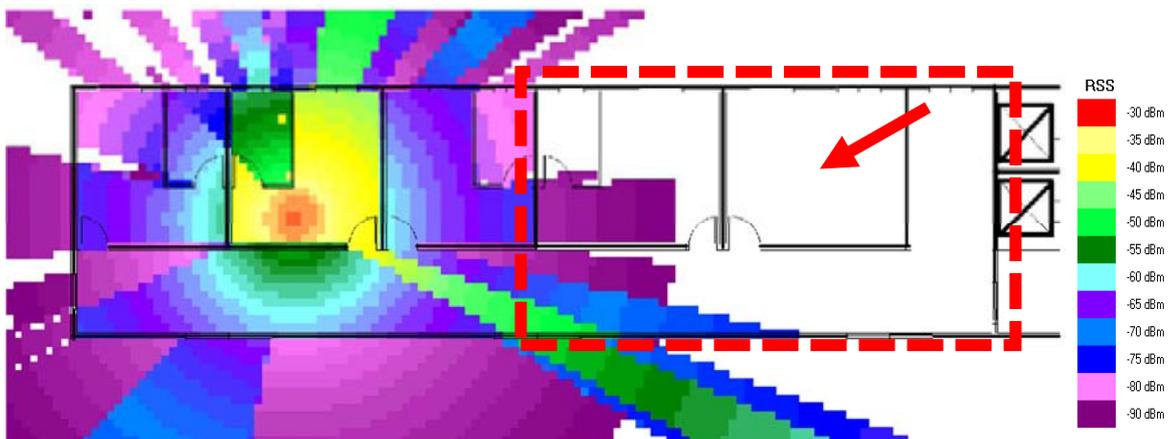
Figura 54. Predição de cobertura de sinal utilizando valores para 5800 MHz, 10 dB de perda por atenuação, padrão encontrado no software de predição.



Fonte: Elaboração própria.

Como pode ser observado na figura 55, utilizando a faixa de frequência de 5800 MHz apresenta pouco sinal nas salas próxima a fonte de transmissão, com as configurações de 19 dB de perda inseridas para as paredes resultaram em uma cobertura menor em propagação em relação ao modelo sugerido no software de predição.

Figura 55. Predição de cobertura de sinal utilizando valores para 5800 MHz, 19 dB de perda por atenuação.



Fonte: Elaboração própria.

6. DISCUSSÃO

Considera-se que a câmara de ensaio utilizada para inserir as paredes apresentou resultados satisfatórios, uma vez que a montagem permitiu bloquear os sinais externos indesejados. Além disso, os desvios ficaram abaixo do limite máximo recomendado em ambiente controlado ± 4 dB, ou seja, os maiores desvios medidos foram na frequência de 5470 MHz em tijolos de 6 furos desvio de 1,35 dB, bloco de tijolos à vista desvio de 1,41 dB, na frequência de 5725 MHz em bloco semi-estrutural concreto de 14 cm vedação desvio de 1,41 dB e na frequência de 5850 MHz em bloco de cerâmica estrutural 14 cm desvio de 1,81 dB. Também foi possível observar que durante as coletas de atenuações os valores de fundo espectrais, ou seja, ruído de fundo, permaneceram iguais aos medidos sem o material construtivo no setup. Todas as coletas estão disponíveis para consulta no *link* dos Apêndices (A) e (B).

A frequência de 915 MHz apresentou valores de atenuações mais altas que as encontradas na literatura, seguindo este comportamento em diferentes materiais e espessuras. Com isso, ocorreu uma vedação de sinal alta em frequências de trabalho mais baixas.

Quando se observa a próxima faixa de frequência, de 1920 MHz, se está dobrando a frequência de trabalho, reduzindo o comprimento de onda, observou-se uma atenuação diferente nos materiais quando comparada à faixa anterior. Portanto, pode-se considerar que o tipo de ambiente e a frequência envolvida são significativos na atenuação do sinal, podendo mudar mesmo em espessuras iguais dos materiais construtivos.

Outro fenômeno observado é que, dependendo da frequência utilizada na pesquisa, o material possui comportamento de perda de sinal similares a outras estruturas com diferentes espessuras, como por exemplo o gráfico 9, onde o material bloco de concreto semi-estrutural apresentou perdas similares ao bloco de cerâmica estrutural. No gráfico 7, a representação das medidas em 915 MHz, os materiais construtivos tijolos de 6 furos e o tijolo do tipo à vista apresentaram muita proximidade na perda por atenuação.

Na análise das atenuações das paredes, é possível verificar que o tipo de material tijolo à vista atingiu os valores menores que o limite inferior de atenuações de sinal em certas faixas de frequência, como é o caso de 1920 MHz e na faixa de 5.8 GHz. Vale notar que em 1920 MHz, outras paredes apresentaram similaridade na medida, é o caso do bloco semi-estrutural de concreto 9 cm de largura de vedação com o bloco cerâmico estrutural de 14 cm de largura, ambos possuem características diferentes no formato e na composição e apresentaram a mesma atenuação.

A faixa de 2400 à 2500 MHz mostrou uma atenuação maior quando comparada as outras frequências. Para paredes de alvenaria, os valores de atenuação podem variar de 5 dB à 15 dB na literatura, mas a maior parte dos tipos de materiais medidos ultrapassaram os valores de referência sendo eles: Tijolos de 6 furos, bloco semi-estrutural de concreto 14 cm e bloco cerâmico estrutural 14 cm, já os bloco semi-estrutural de 9 cm e tijolo a vista, ambos com o mesma largura de vedação de parede ficaram próximos do limite máximo encontrado na referência que foi 15 dB.

É possível verificar que na câmara de ensaio nas emissões de sinais com frequências acima de 5725 MHz, a antena interna capturou níveis mais elevados de RSSI. Vale notar que a parede possui uma boa vedação de sinal em frequências com o comprimento de onda menor, neste sentido era esperado obter atenuações maiores a partir de 5725 MHz, o que não se observou durante as várias coletas realizadas.

Já em 5150 MHz, 5350 MHz e 5470 MHz mostrou-se uma atenuação maior na polarização vertical das antenas quando comparado ao mesmo valor medido em polarização horizontal. Neste caso o material apresentou uma perda dentro dos limites esperados em relação a faixa de frequência e a espessura de vedação.

Neste sentido pode-se dizer que na faixa de 5.8 GHz, a espessura do material não é somente um dos fatores determinantes para atenuação do sinal, mas a sua densidade e o tamanho das cavidades internas dos tipos de blocos podem gerar uma atenuação maior ou até mesmo menor do sinal eletromagnético.

Conforme a simulação de cobertura de sinal gerada a partir das atenuações, foi possível perceber que em alguns casos o tipo de material construtivo utilizado na planta pode contribuir na diminuição da área de cobertura do sinal, conseqüentemente aumentando a necessidade de mais de fontes transmissora, em virtude da perda por penetração da onda eletromagnética no material. Portanto, utilizar os valores coletados neste trabalho nos *softwares* de predição pode contribuir para aumentar a base de dados para a geração de mapas de cobertura em ambiente *indoor*.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve a finalidade de coletar, de forma exploratória, a atenuação do sinal eletromagnético nos materiais utilizados em construções tipicamente brasileiros como os tijolos comuns, os blocos cerâmicos estruturais e os blocos de concreto semi-estruturais.

Através do número de medidas, foi possível identificar comportamentos de atenuações sobre os materiais em virtude da frequência utilizada, sendo que estes valores coletados poderão servir de parâmetros nas configurações de ferramentas gráficas de predição, para a geração de cobertura indoor, necessários para um projeto de redes de telecomunicações sem fio, que fazem uso da propagação do sinal eletromagnético através de uma estrutura um importante parâmetro utilizado em estudos de propagação de cobertura de RF.

A maioria das aplicações utilizadas no interior dos ambientes partem de dispositivos *wireless*, como Wi-Fi, telefones sem fio IP(Internet Protocolo) e rede sensores sem fio em IoT(Internet das coisas). Neste contexto, julga-se ser importante que a indústria da construção possa desenvolver materiais inovadores que permitam a transparência da propagação para sinal de rádio frequência, em virtude do crescente desenvolvimento de ambientes automatizados, embora este não tenha sido o enfoque do presente trabalho.

Para trabalhos futuros, sugere-se ampliar os tipos dos materiais, utilizando composições diferentes de acabamento, praticados em construções tipicamente brasileiras.

Além disso, sugere-se procurar melhorar a blindagem da caixa de coleta de dados, para frequências mais altas, na faixa de 5725 MHz à 5850 MHz, uma vez que o desempenho das medidas não apresentou valores satisfatórios se comparados com os disponíveis na literatura. Além disso, algumas medidas nesta faixa de frequência foram muito discrepantes na polarização horizontal e vertical da antena.

É preciso investigar a composição química dos materiais construtivos, para cada tipo de aplicação poderá afetar no comportamento da atenuação do sinal de rádio frequência.

Uma limitação encontrada se deu na estrutura utilizada para a coleta das medidas, sendo interessante procurar aumentar a carga suportada pelo modelo, para acomodar paredes de maior espessura e peso, sem comprometer a segurança ou danificar a caixa.

Sugere-se realizar as medidas em câmara semi-anecoica de maiores dimensões, visando medir os diversos tipos de materiais construtivos e fazer a calibração do modelo de coleta, com os ensaios em ambientes revestidos com absorvedores de sinal, visando eliminar os fenômenos causados durante a propagação da onda eletromagnética, principalmente em frequências elevadas.

Por fim, seria útil automatizar o ajuste de polarização das antenas envolvidas no *setup*, sendo que com este processo de controle em cada etapa de coleta pode-se encontrar ângulos com menor e maior diretividade da antena, resultando em variações de atenuações no material estudado.

I. REFERÊNCIAS

AARONIA, *Log periodic antenna spans 380mhz to 18ghz hyperlog 30180*, Disponível em: <<https://www.aaronia.com/products/antennas/HyperLog-30180-Log-Periodic-Antenna/>> (acesso em 10 de abril. 2019).

ABNT NBR 15.270-1. Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2017a.

ABNT NBR 15.270-2. Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria Parte 2: Métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2017b.

ADVANTEST, Disponível em: <<https://www.advantest.com/>> (acesso em 23 de maio, 2019)

AIRMAGNET, Disponível em: < <https://enterprise.netscout.com/ppc/wireless-survey-wlan-design>> (acesso em 26 de abril, 2018).

ANATEL, Agência Nacional de telecomunicações, SEI/ANATEL – 1809516, Ato Nº 11542, de 23 de agosto de 2017, Disponível em: <https://sei.anatel.gov.br/sei/modulos/pesquisa/md_pesq_documento_consulta_externa.php?eEP-wqk1skrd8hSlk5Z3rN4EVg9uLJqrLYJw_9INcO5-y7fm8eWD28Qp8-xs125fkanWA4C2TZpCpRRZgt0cK41HPMJWkeRGEd-gfwhaBCaEniHJACqPPXyduBCKsCdm> (acesso em 7 maio, 2019).

ANATEL, Agência Nacional de telecomunicações, Resolução no 700, de 28 de setembro de 2018., v. 120, p. 5–11, 2019.

ANDERSEN, J. B.; RAPPAPORT, T. S.; YOSHIDA, S. Propagation Measurements and Models for Wireless Communications Channels. *IEEE Communications Magazine*, v. 33, n. 1, p. 42–49, 1995.

ARTEMENKO, O.; RUBINA, A.; NAYAK, A. H.; MENEZES, S. B.; MITSCHLE-THIEL, A. Research Article Evaluation of different signal propagation models for a mixed indoor-outdoor scenario using empirical data. *EAI Endorsed Transactions on Mobile Communications and Applications*, v. 2, n. 7, p. 1–8, 2016. Disponível em: <<https://doaj.org/article/07b00bda117142c189dbb29583cc1b8e>>.

AVAYA, WLAN. Avaya WLAN 2300 Outdoor Solution Guide. [s.l.: s.n., s.d.].

BREEZENET. BreezetNet Pro, Cat. No. 213178, disponível em: <<ftp://62.77.85.106/BR/BreezeNET-PRO11-Ver51.pdf>> (acesso em 26 de novembro. 2018).

CHIALINA, S.; CICUTTIN, M.; CODECASA, L.; et al. Modeling of Anechoic Chambers with Equivalent Materials and Equivalent Sources. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v. 58, n. 4, p. 956–963, 2016.

COST 231. Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems – Final Report. Chapter 4 p. 175-176, Brussels, 1999.

DOBKIN, D. M. *RF Engineering for Wireless Networks: Hardware, Antennas, and Propagation* (Communications Engineering). Chapter 7 p. 315-323, Newnes, 2005.

EKAHAU, Disponível em: < <https://www.ekahau.com/pt> > (acesso em 26 de abril, 2018).

FAFOUTIS, X.; MELLIOS, E.; TWOMEY, N.; *et al.* An RSSI-based wall prediction model for residential floor map construction. IEEE World Forum on Internet of Things, WF-IoT 2015 - Proceedings, p. 357–362, 2015.

FERREIRA, D.; CUINAS, I.; CALDEIRINHA, R. F.S.; *et al.* Assessing Transparency Control of Southern European Building Wall Structures Using Frequency-Selective Surfaces [Wireless Corner]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, v. 60, n. 5, 2018.

ITU-R. Effects of building materials and structures on radiowave propagation above about 100 MHz P Series Radiowave propagation. Recommendation ITU-R P.2040, v. 2040, 2013. Disponível em: <<http://www.itu.int/rec/R-REC-P.2040-0-201309-I>>.

ITU-R. Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz Recommendation, I.-R. (2015). Propagation data and prediction methods for the planning of. Recommendation ITU-R, v. 9, p. 1238–8, 2015.

ITU-R P.1238-7 “Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunications systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz”, ITU-R Recommendation P.1238-7, February 2012, Disponível em: < <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.1238-7-201202-I/en>>.

LANPLANNER, Disponível em: < <http://www.prologixdistribution.com/motorola-solutions/LANPlanner-Software>> (acesso em 26 de abril, 2018).

L-COM, HG908P-NF, Disponível em: <<http://www.l-com.com/wireless-antenna-900-mhz-8-dbi-flat-patch-antenna-12-in-n-female-connector>> (acesso em 10 de abril, 2019).

L-COM, RE11DP, Disponível em: <http://www.l-com.com/multimedia/datasheets/DS_RE11DP-XX.PDF> (acesso em 10 de abril, 2019).

L-COM, HG2458-09P, Disponível em: <<http://www.l-com.com/wireless-antenna-24-5-ghz-9-dbi-flat-panel-antenna-n-female-connector>> (acesso em 10 de abril, 2019).

LEE, D. C. K.; M. J. Neve and K. W. Sowerby, "The Impact of Structural Shielding on the Performance of Wireless Systems in a Single-Floor Office Building," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 6, no. 5, pp. 1787-1695, May 2007.

LI, L.; IBDAH, Y.; DING, Y.; et al. Indoor multi-wall path loss model at 1.93 GHz. Proceedings - IEEE Military Communications Conference MILCOM, p. 1233–1237, 2013.

MICHELI, D.; DELFINI, A.; SANTONI, F.; VOLPINI, F.; MARCHETTI, M. Measurement of electromagnetic field attenuation by building walls in the mobile phone and satellite navigation frequency bands. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, v. 14, p. 698–702, 2015. IEEE.

MICHELI, D.; GIANOLA, P.; BERTIN, G.; et al. Electromagnetic Shielding of Building Walls: From Roman times to the present age. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, v. 58, n. 5, p. 20–31, 2016. IEEE.

MORAIS, G. I.D E. Avaliação das perturbações eletromagnéticas radiadas de equipamentos eletrodomésticos na rssf. Dissertação de Mestrado em Gestão de Redes de Telecomunicações Pontifícia Universidade Católica, CAMPINAS 2018.

NARIMANI, G.; MARTIN, P. A.; TAYLOR, D. P. Analysis of Ultrawideband Pulse Distortion Due to Lossy Dielectric Walls and Indoor Channel Models. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. 64, n. 10, p. 4423–4433, 2016. IEEE.

PASZTORY, Z.; PERALTA, P. N.; MOLNAR, S.; *et al.* Modeling the hygrothermal performance of selected North American and comparable European wood-frame house walls. *Energy and Buildings*, v. 49, p. 142–147, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.003>>.

PERES, A. Mecanismo de autenticação baseado na localização de estações sem fios padrão IEEE 802.11,. Tese de Doutorado em Ciência da Computação Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre 2010. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/18634/1/000729269.pdf>>.

PHONGPHANPHANEE, C.; MITCHELL, T.; STEELE, R. DECT coverage of indoor-outdoor environments. *IEEE Communications Letters*, v. 3, n. 6, p. 161–163, 1999.

RAPPAPORT, T. S.; SANDHU, S. Radio-wave propagation for emerging wireless personal-communication systems - *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 36, n. 3, p. 14–24, 1994. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1021907>.

RAPPAPORT, T. S. *Wireless Communications. Principles & Practice*. Primeira Edição. Prentice Hall, PTR. Nova Jersey, EUA. 1999.

RUDD, R.; CRAIG, K.; GANLEY, M.; Hartless, R. Building Materials and Propagation Final Report Ofcom. n. September, p. 40, 2014.

ROHDE&SCHWARZ, Disponível em: < https://www.rohde-schwarz.com/us/product/smt-options_63490-7568.html> (acesso em 01 de maio, 2019).

SANCHES, C.A. – Projetando redes WLAN – Conceitos e práticas 1ª ed., - Editora Érica - S. Paulo – 2005.

SANTOSMADEIRA, *Woodframe*, Disponível em: <<http://woodframe.santosmadeiras.com.br/o-que-e-wood-frame/>> (acesso em 20 de março. 2019).

STEELE, R.; WILLIAMS, J.; CHANDLER, D.; DEGHAN, S.; COLLARD, A. DCS1800 in Street Microcells., n. March, p. 102–108, 1995.

STONE, W. C. Electromagnetic Signal Attenuation in Construction Materials. NISTIR 6055, NIST Construction Automation Program Report No. 3, United States Department of Commerce Technology Administration, 1997.

TORNEVIK, C. & all. Propagation models, cell planning and channel allocation for indoor application of cellular systems, 43rd IEEE vehicular technology conference, New Jersey, 1993

TUTTLE, R. Normalized Site Attenuation Test Report. Shielding integrity services, Report 1176-NSA. Colorado Springs, USA, p1-21, 2012.

UNIFY. HiPath Cordless IP, Administrator Documentation, 2015 disponível em: <https://wiki.unify.com/wiki/File:HiPath_Cordless_IP_V1,_Administrator_Documentation.pdf>

VO DAI, T. K.; THAI, A.; PHAN, T.; KILIC, O.; RUSSO, K. Construction of an Inexpensive Anechoic Chamber and Its Applications in Undergraduate Research [Education Corner]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, v. 60, n. 4, p. 102–112, 2018. IEEE.

ZVANOVEC, S.; PECHAC, P.; KLEPAL, M. Wireless LAN Networks Design: Site Survey or Propagation Modeling? Wireless Lan Networks Design. p. 42–49, 2003.

WILLIAMS, T. EMC for Product Designers 3rd Edition - Tim Williams - Newnes.pdf., 2001.

WINPROP, Disponível em: <https://altairhyperworks.com/product/FEKO/WinProp-Propagation_Modeling> (acesso em 26 de abril, 2018).

APÊNDICES

APÊNDICE A – PERDA DO SINAL SEM O MATERIAL CONSTRUTIVO

Link: https://drive.google.com/open?id=1pHsw6XE3jOIBv2ri4_tfc2s1lYt8_6wA

APÊNDICE B - MEDIDAS DE ATENUAÇÕES DAS PAREDES

Link: https://drive.google.com/open?id=1N-r7zAZsaV_V_FoCCdUX8HwOQB-0dNYs

APÊNDICE C – GRÁFICO GERADO A PARTIR DAS 30 MEDIDAS DE COLETAS DE SINAL.

Gráfico C.1 - Atenuações para as frequências medidas – Blocos cerâmicos não estrutural com 14.4 cm de largura.

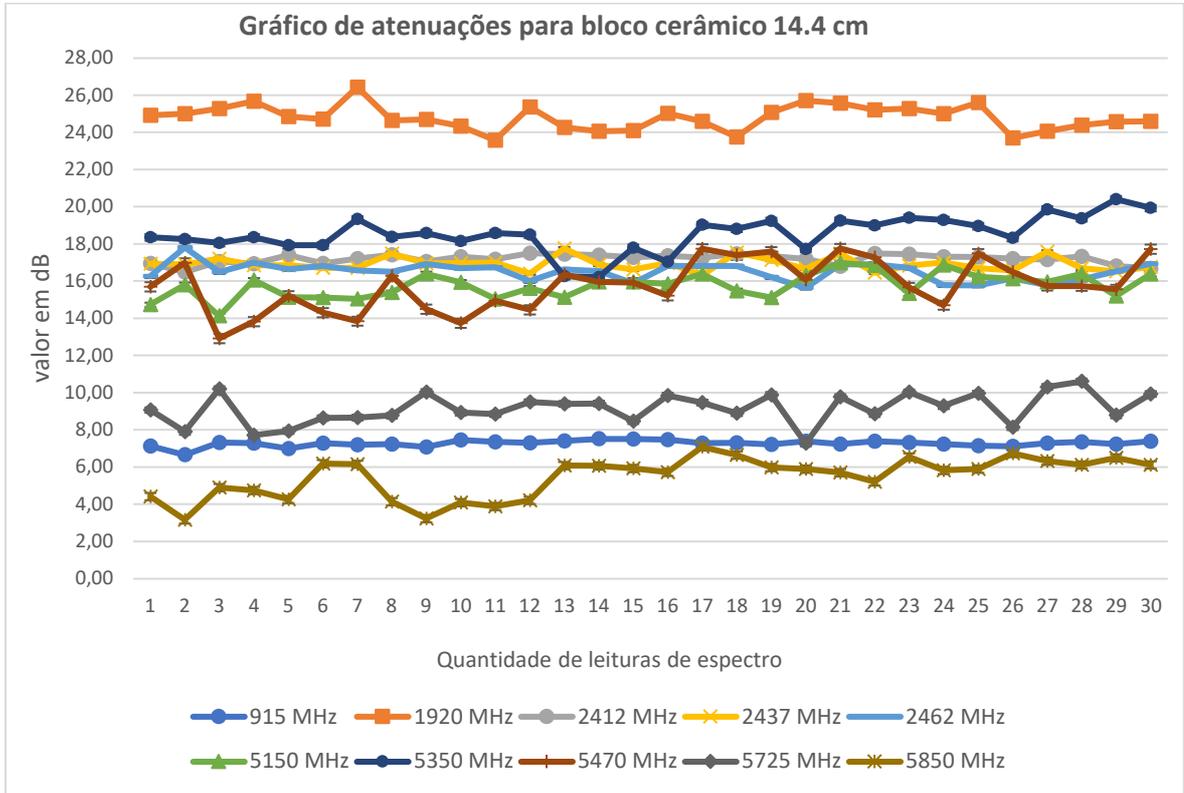


Gráfico C.2 - Gráfico de atenuações para as frequências medidas – Material bloco de cerâmica estrutural de largura 14 cm

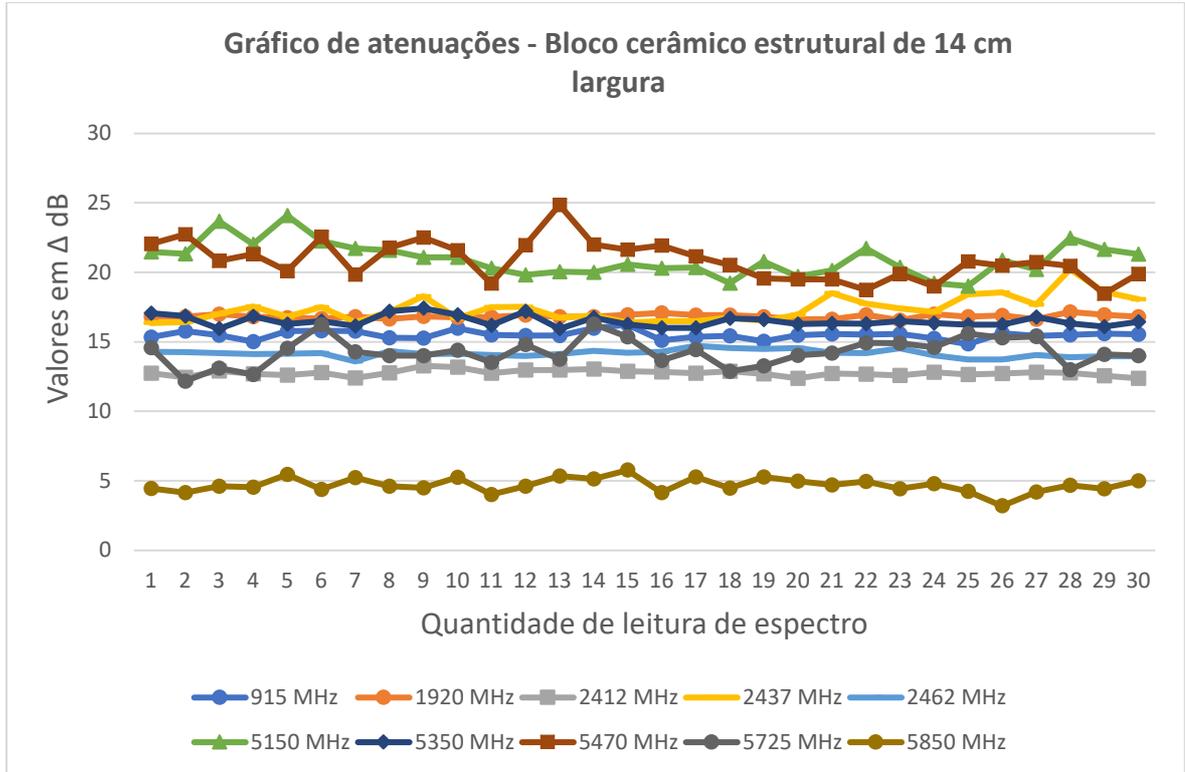


Gráfico C.3 - Gráfico de atenuações para as frequências medidas – Material tijolos à vista.

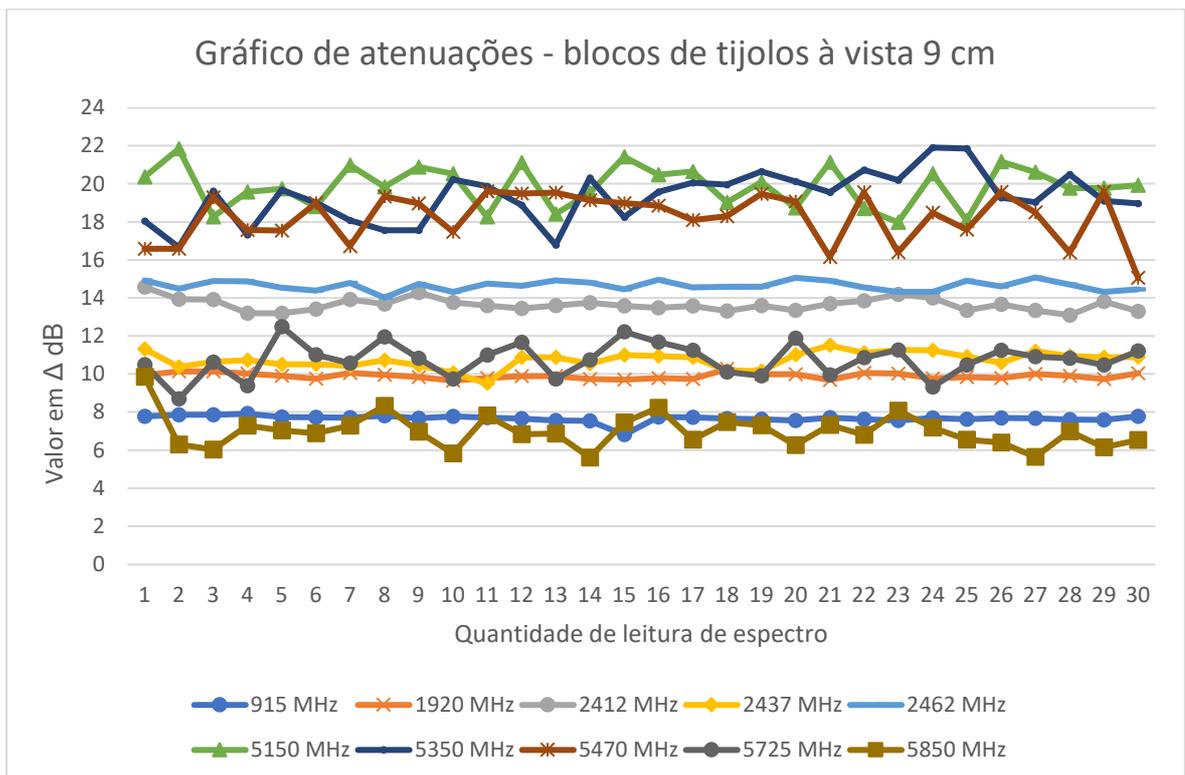


Gráfico C.4 – Gráfico de atenuações para as frequências medidas – Material bloco de concreto estrutural de 9 cm largura.

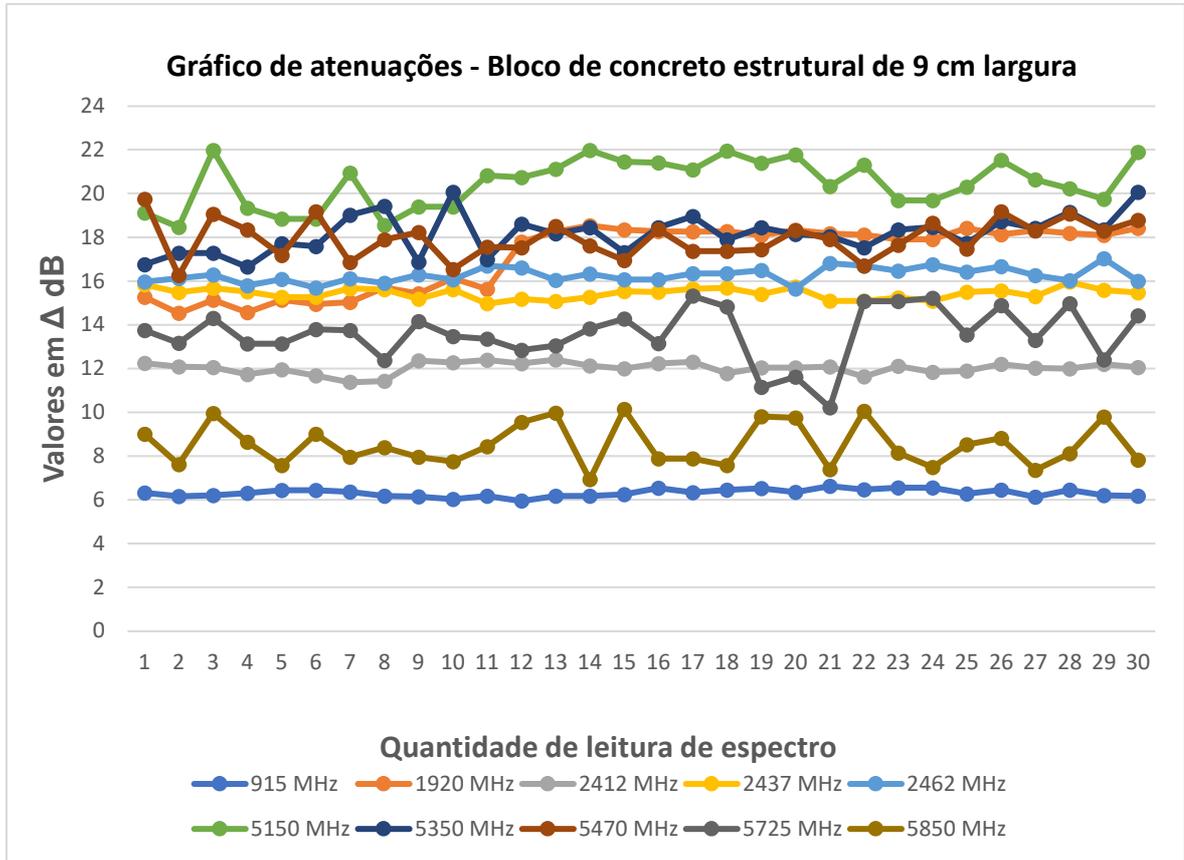
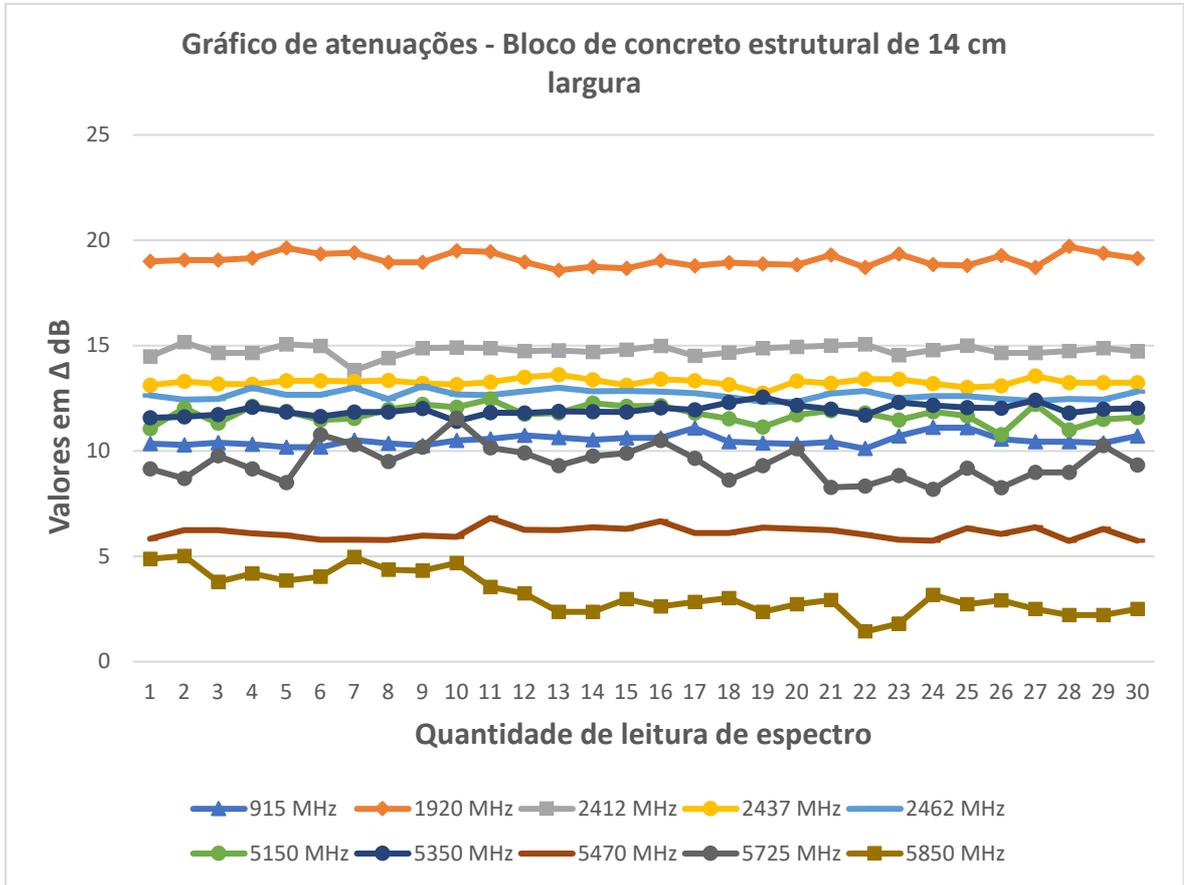


Gráfico C.5 - Atenuações para as frequências medidas – Material bloco de concreto estrutural de 14 cm largura.



APÊNDICE D – VERIFICAÇÃO DE SAÍDA DE POTÊNCIA DO GERADOR DE RF.

Link: <https://drive.google.com/open?id=13hSA9ptM8GbaMBvcjP0FiN-sqRgR-pcv>

