

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA

CHARLLES DE SOUZA MARINHO

**CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS ABSORVEDORES DE ONDAS
ELETROMAGNÉTICAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Dezembro de 2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA

CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS ABSORVEDORES DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

Trabalho de Conclusão de Curso submetida à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande como
parte dos requisitos necessários para obtenção
da graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador

Prof. Marcelo Sampaio de Alencar, Ph.D.

Co-orientador

Eng. Fausy Solino Dias, M. Sc

Aluno: Charlles de Souza Marinho

Matrícula: 20411265

Dezembro de 2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA

CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS ABSORVEDORES DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial necessário para a
obtenção da graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de
Campina Grande.

Julgado em __/__/__

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Marcelo Sampaio de Alencar, Ph.D.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador

Eng. Fausy Solino Dias, M.Sc
Co-orientador

Convidado

Campina Grande – Paraíba
Dezembro de 2009

Agradecimentos

Aos meus Pais e irmãos pela compreensão da minha ausência, pelos ensinamentos tão dignos e nobres, pelos esforços, confiança e amor que me dedicaram.

A Deus por mostra o melhor caminho a seguir dia após dia.

Ao Professor Marcelo Sampaio de Alencar e ao aluno de doutorado Fausy Solino Dias por terem propiciado os meios para que este trabalho fosse concluído com êxito.

Aos amigos, pelo incentivo e apoio que de certa forma colaboraram com este trabalho.

Agradeço também a todos aqueles, que não por menor importância, não foram citados, mas que também tiveram grande contribuição na realização do sonho de adquirir o título de engenheira eletricista.

Resumo

Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (MARE) são feitos com substâncias dielétricas ou magnéticas, e são produzidos de forma a promoverem uma elevada absorção na intensidade do campo eletromagnético incidente sobre eles. Esses materiais são utilizados, nas áreas militar e civil, em câmaras anecóicas e isoladores. Este trabalho aborda a caracterização do nível de absorção, nas frequências de 462,56 MHz e 1,80 GHz, de conjuntos de materiais encontrados no comércio local. Para tanto, as medidas foram realizadas em caixas de cerâmicas revestidas por diferentes misturas de materiais. Os materiais utilizados foram resina asfáltica, grafite, emulsão asfáltica e resina de poliéster insaturada. Uma atenuação superior a 50% é obtida quando o MARE é composto por emulsão asfáltica e grafite.

Palavras chave: Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética, resina asfáltica, grafite, emulsão asfáltica, resina de poliéster insaturada e UHF.

ABSTRACT

Radar Absorbing Material (RAM) are made of dielectric or magnetic substances, and are produced in a way to promote a high absorption of the electromagnetic field intensity incident on them. Those materials are used in military and civilian areas, anechoic chambers and insulators. This report discusses the characterization of the level of absorption, in the range of 462.56 MHz and 1.80 GHz, for materials found in local shops. To this end, the measurements were carried out in ceramic boxes coated with different mixtures of materials. The materials used were asphalt resin, graphite, asphalt emulsion and unsaturated polyester resin. An attenuation greater than 50% is obtained when the RAM is composed of asphalt emulsion and graphite.

Key words: Absorbing Materials Electromagnetic Radiation, asphalt resin, graphite, asphalt emulsion, unsaturated polyester resin and UHF.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1– Fonte geradora de interferência, Canal de transmissão, Sistema vulnerável	10
Figura 1.2 – Marcapasso cardíaco Wi Fi atingido por ondas eletromagnéticas.....	11
Figura 2.3 – Propagação da onda eletromagnética	14
Figura 2.3 – Estrutura de Salisbury. E_i – Intensidade do campo incidente, E_t – Intensidade do campo transmitido, E_r – Intensidade do campo refletido.....	18
Figura 2.4 – Câmara Anecóica [11]	19
Figura 2.5 – Parede da Câmara Anecóica.....	19
Figura 3.1 – Fluxograma das etapas realizadas neste trabalho.....	20
Figura 3.2 – a) Visão em perspectiva; b) Visão superior. Caixas sem revestimento.	21
Figura 3.3 – Vista das caixas pequena e grande, revestidas com o conjunto1.....	22
Figura 3.4 – Caixas pequena e grande revestidas comoconjunto2.....	22
Tabela 3.1 – Custo de fabricação dos revestimentos das caixas	23
Figura 3.5 - Sentido de aplicação das camadas. Os materiais são representados pelas cores: (■) cerâmica; (■) FrioAsfalto e (■) grafite.	24
Figura 3.6 – Sentido de aplicação das camadas. Os materiais são representados pelas cores: (■) cerâmica; (■) massa anti-ruído; (■) grafite e (■) adesivo plástico.	25
Figura 3.5 – Atenuação sofrida pela onda ao passar pelo MARE.....	26
Figura 3.6 – Forma de medição da absorção para a frequência do celular.....	27
Figura 3.7 – Posicionamento dos equipamentos para medição com o <i>Talkabout</i>	27
Figura 4.2 – Medida experimental da atenuação das caixas grandes para o celular	29
Figura 4.3 – Medida experimental da atenuação das caixas pequenas para o <i>Talkabout</i>	30
Figura 4.4 – Medida experimental da atenuação das caixas grandes para o <i>Talkabout</i>	30
Figura 4.5 – Medidas interna da caixa projetada.....	32
Figura 4.6 – A cor vermelha indica o quanto a onda percorrerá até atingir a placa (1,80 GHz)	33
Figura 4.6 – A cor vermelha indica o quanto a onda percorrerá até atingir a placa (462,56 MHz).....	34
Figura A – 1.1 Sinal do coletado do celular sem nenhum MARE	39
Figura A – 1.2 Sinal do coletado do celular com a caixa pequena sem revestimento.....	39
Figura A – 1.3 Sinal do coletado do celular com a caixa grande sem revestimento	40
Figura A – 1.4 Sinal do coletado do celular com a caixa pequena com revestimento de FrioAsfalto.....	40
Figura A – 1.5 Sinal do coletado do celular com a caixa grande com revestimento de FrioAsfalto.....	41
Figura A – 1.6 Sinal do coletado do celular com a caixa pequena com revestimento de Massa Anti-Ruído.....	41
Figura A – 1.7 Sinal do coletado do celular com a caixa grande com revestimento de Massa Anti-Ruído.....	42
Figura A – 1.8 Sinal do coletado do <i>Talkabout</i> sem nenhum MARE.....	42
Figura A – 1.9 Sinal do coletado do <i>Talkabout</i> com a caixa pequena sem revestimento	43
Figura A – 1.10 Sinal do coletado do <i>Talkabout</i> com a caixa grande sem revestimento.....	43
Figura A – 1.11 Sinal do coletado do <i>Talkabout</i> com a caixa pequena com revestimento de FrioAsfalto.....	44

Figura A – 1.12 Sinal do coletado do <i>Talkabout</i> com a caixa grande com revestimento de FrioAsfalto.....	44
Figura A – 1.13 Sinal do coletado do <i>Talkabout</i> com a caixa pequena com revestimento de Massa Anti-Ruído.....	45
Figura A – 1.14 Sinal do coletado do <i>Talkabout</i> com a caixa grande com revestimento de Massa Anti-Ruído.....	45

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	7
1 INTRODUÇÃO.....	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 PROPAGAÇÃO DA ONDA ELETROMAGNÉTICA	12
2.1.1 Campo Eletromagnético.....	12
2.1.2 Propagação do Campo Eletromagnético	14
2.2 MATERIAIS ABSORVEDORES DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA - MARE.....	15
2.2.1 Caracterização da propagação da onda eletromagnética por MARE	15
2.2.2 Técnicas de atenuação da radiação	17
a) Cancelamento de fase da onda eletromagnética	18
b) Técnica de espalhamento da onda eletromagnética	18
c) Utilização de materiais com perdas magnéticas e dielétricas	19
3 METODOLOGIA.....	20
3.1 MATERIAIS	20
3.1.1 Caixas sem revestimentos	21
3.1.2 Caixas revestidas com o conjunto 1	21
3.1.3 Caixas revestidas com o conjunto 2	22
3.1.4 Caracterização da Absorção Eletromagnética.....	23
3.1.5 Custo de produção das caixas	23
3.2 MODO DE PREPARAÇÃO DAS CAIXAS.....	24
3.2.1 Caixas com camadas de materiais do conjunto 1	24
3.2.2 Caixas com camadas de materiais do conjunto 2	25
3.3 MEDIÇÕES.....	26
3.3.1 Configuração para medições feitas para o celular.....	26
3.3.2 Configuração para medições feitas para o <i>Talkabout</i>	27
4 RESULTADOS	28
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS	32
6 CONCLUSÃO.....	35
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	36
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37
BIBLIOGRAFIA	38
ANEXO 1	39

1 INTRODUÇÃO

A crescente procura por materiais absorvedores de radiações eletromagnéticas tem impulsionado, cada vez mais, pesquisas nesse campo. Uma dos motivos para esse aumento é a radiação eletromagnética indesejada, pois com o avanço dos equipamentos eletrônicos com frequências mais elevadas, esse tipo de radiação ocasiona interferência eletromagnética (EMI – *Electromagnetic Interference*). Para que ocorra esta interferência são necessários um sistema gerador, um sistema vulnerável e um canal, como apresentada na Figura 1.1. Quando o canal é diferente do ar ou do vácuo, como no caso dos cabos de transmissão de energia elétrica, a interferência é do tipo conduzida. Quando o canal é o ar, o gás ou o vácuo, a interferência é do tipo irradiada [1].

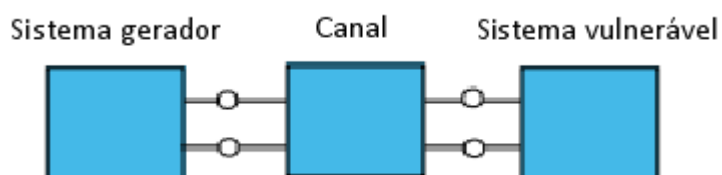


Figura 1.1– Fonte geradora de interferência, Canal de transmissão, Sistema vulnerável

Devido à ocorrência da EMI o estudo da compatibilidade eletromagnética (EMC – *Electromagnetic Compatibility*) se torna importante, pois a falta da EMC ocasiona falhas na transmissão de informação, por exemplo, nas imagens de um televisor afetadas por harmônicos liberados pela rede de tensão elétrica, em circuitos eletrônicos, ou algo mais grave como a alteração na programação de um marcapasso (vide Figura 1.2), ocasionando taquicardia no portador, com risco iminente de morte, só por ele estar próximo a uma fonte eletromagnética, tal qual uma antena de celular.

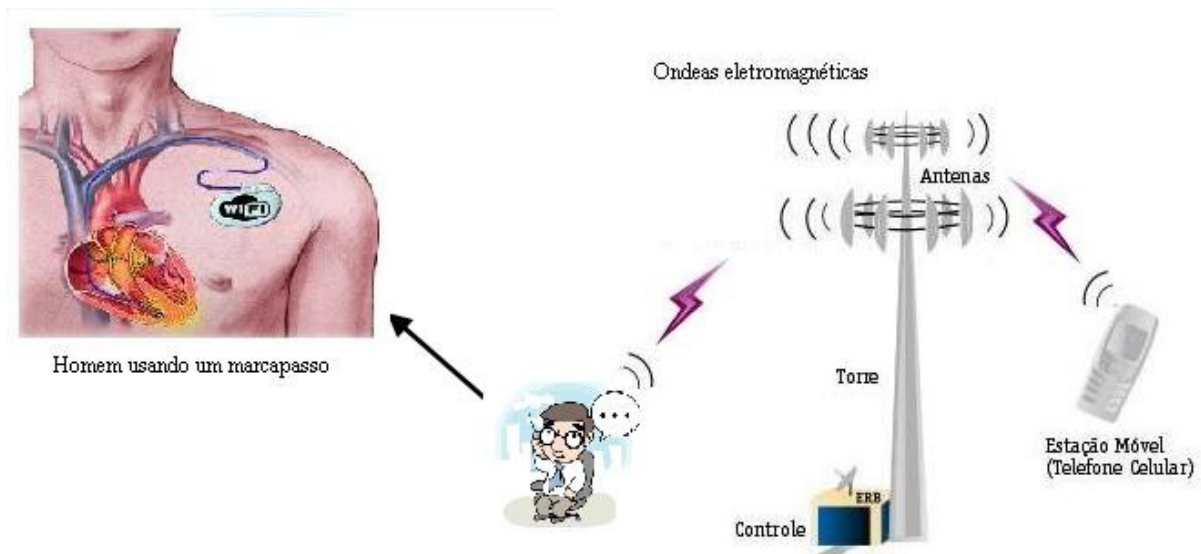


Figura 1.2 – Marcapasso cardíaco Wi Fi atingido por ondas eletromagnéticas.

A EMC pode ser definida como a capacidade de um sistema eletroeletrônico de funcionar corretamente em ambiente eletromagnético e não ser a fonte de interferência nesse ambiente. Ou seja, com ausência de EMI.

Há vários tipos de ensaios para a determinação dos níveis de EMC/EMI de equipamentos e/ou dispositivos. Os ensaios testam sua imunidade e, conseqüentemente, susceptibilidade a interferências internas e externas.

O ambiente de teste ideal para a realização de ensaios de EMC/EMI é em campo aberto, onde não há reflexão, pois este espaço é tido como sendo livre de obstáculos, e a intensidade eletromagnética decresce com o inverso da distância da antena ao ponto de medição [2]. Um bom exemplo para simulação desse ambiente é uma câmara anecóica. Ela é constituída por materiais absorvedores de radiação eletromagnética em paredes, pisos, e teto, de forma que a radiação emitida por uma fonte, seja refletida ou dispersada, tornando a reflexão sobre o equipamento a mínima possível [3].

A interferência eletromagnética pode ser diminuída com a utilização de materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE) (ou RAM – *Radar Absorbing Material*) e de estruturas absorvedoras de radar (RAS – *Radar Absorbing Structures*). As RAS são utilizadas na construção de estruturas protetoras de radar como radomes¹. Apesar de não representar uma fatia expressiva de mercado, a área que envolve essa tecnologia vem

¹É uma estrutura, resistente, que protege a antena de radar e também das intempéries do ambiente (por exemplo, vento, chuva, gelo, areia). O radome é construído de material que minimamente atenua o sinal eletromagnético transmitido ou recebidos pela antena.

recebendo significativos recursos e uma expressiva atenção governamental, ao redor do mundo [4].

A evolução da tecnologia de produção do MARE está relacionada diretamente com o estudo dos materiais mais baratos e exploração de técnicas para obtenção de revestimentos com qualidades de absorção da radiação eletromagnética, para uma faixa cada vez mais ampla do espectro. As aplicações desses materiais concentram-se no setor da indústria de telecomunicações e aeronáutica, como exemplo pode-se citar o revestimento de câmara anecóica, blindagem de ambientes com fontes intensas de rádio frequência (RF) danosas ao tecido humano, blindagens de fornos de micro-ondas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste item é apresentada uma pequena revisão bibliográfica dos conceitos utilizados para caracterização das propriedades eletromagnéticas dos MARE.

2.1 PROPAGAÇÃO DA ONDA ELETROMAGNÉTICA

2.1.1 Campo Eletromagnético

A caracterização do campo eletromagnético é dada por meio das Leis de Maxwell que são dadas pelas Equações 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4 [5,6]:

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\vec{B} \therefore \nabla \times \vec{e} = -\frac{\partial \vec{b}}{\partial t}, \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + j\omega\vec{D} \therefore \nabla \times \vec{h} = \frac{\partial \vec{d}}{\partial t} + \vec{j}, \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \therefore \nabla \cdot \vec{d} = \rho, \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \therefore \nabla \cdot \vec{b} = 0, \quad (2.4)$$

em que:

$\vec{E}, \vec{e} \rightarrow$ Intensidade de campo elétrico, em volts por metro [V/m];

$\vec{H}, \vec{h} \rightarrow$ Intensidade de campo magnético, em ampère por metro $[A/m]$;

$\vec{D}, \vec{d} \rightarrow$ Densidade de fluxo de campo elétrico, em coulomb por metro quadrado $[C/m^2]$;

$\vec{B}, \vec{b} \rightarrow$ Densidade de fluxo de campo magnético, em weber por metro quadrado $[Wb/m^2]$;

$\vec{J}, \vec{j} \rightarrow$ Densidade de corrente elétrica, em ampère por metro quadrado $[A/m^2]$;

$\rho \rightarrow$ Densidade de carga elétrica, em coulomb por metro cúbico $[C/m^3]$.

Os meios nos quais os fenômenos eletromagnéticos se processam são caracterizados no domínio da frequência por valores de permissividade (ϵ), permeabilidade (μ) e condutividade elétrica (σ). Logo, têm-se as seguintes Equações 2.5, 2.6 e 2.7 [6]:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}, \quad (2.5)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad (2.6)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}, \quad (2.7)$$

em que:

$\vec{D} \rightarrow$ Densidade de fluxo de campo elétrico, em coulomb por metro quadrado $[C/m^2]$;

$\vec{E} \rightarrow$ Intensidade de campo elétrico, em volt por metro $[V/m]$;

$\epsilon \rightarrow$ Permissividade, em faraday por metro $[F/m]$;

$\vec{B} \rightarrow$ Densidade de fluxo de campo magnético, em weber por metro quadrado $[Wb/m^2]$;

$\vec{H} \rightarrow$ Intensidade de campo magnético, em ampère por metro $[A/m]$;

$\mu \rightarrow$ Permeabilidade, em henry por metro $[H/m]$;

$\vec{J} \rightarrow$ Densidade de corrente elétrica, em ampère por metro quadrado $[A/m^2]$;

$\sigma \rightarrow$ Condutividade elétrica, em siemens por metro [S/m].

2.1.2 Propagação do Campo Eletromagnético

A onda do campo eletromagnético é constituída por um campo elétrico \vec{E} e outro magnético \vec{H} , onde esses campos são perpendiculares entre si, como mostra a Figura 2.3. Nota-se que \vec{H} e \vec{E} propagam-se na mesma direção e são ortogonais entre si e à direção de propagação. Esta propriedade torna \vec{E} e \vec{H} uma onda eletromagnética transversa (TEM). Este tipo de onda também recebe o nome de onda plana uniforme, pois as intensidades dos campos elétricos e magnéticos estão em direções fixas do espaço e são constantes em magnitude e fase sobre um plano perpendicular à direção de propagação.

Ao se propagar no espaço livre a onda eletromagnética tem velocidade de propagação de $2,998 \times 10^8$ m/s, que corresponde à velocidade da luz (c) [5,6]. O comprimento de onda (λ) de uma onda eletromagnética varia de acordo com o inverso da frequência (f), ou seja, $\lambda = c/f$.

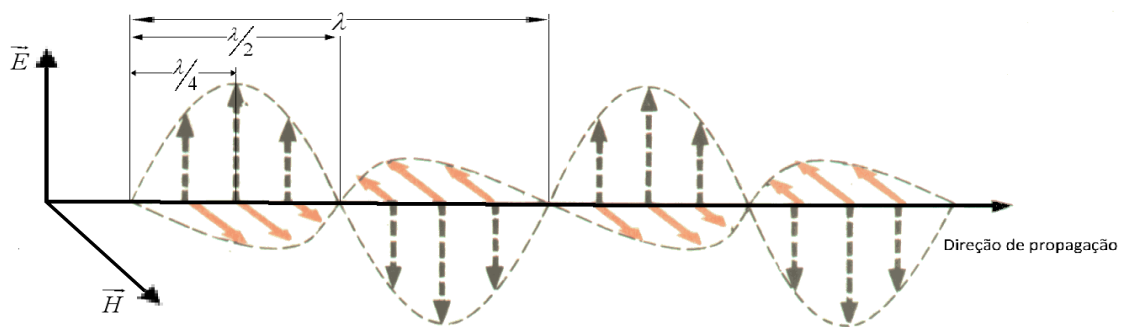


Figura 2.3 – Propagação da onda eletromagnética

A propagação do campo eletromagnético em um meio é função da permissividade elétrica (ϵ) e da permeabilidade magnética (μ) deste meio. Essas grandezas físicas podem ser colocadas na seguinte forma complexa [5]:

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (2.8)$$

$$\mu_r = \mu_r' - j\mu_r'' \quad (2.9)$$

em que:

$\varepsilon_r \rightarrow$ Permissividade complexa relativa, em faraday por metro [F/m];

$\varepsilon_r' \rightarrow$ Componente real da permissividade relativa complexa;

$\varepsilon_r'' \rightarrow$ Componente imaginária da permissividade relativa complexa;

$\mu_r \rightarrow$ Permeabilidade complexa relativa, em henry por metro [H/m];

$\mu_r' \rightarrow$ Componente real da permeabilidade relativa complexa;

$\mu_r'' \rightarrow$ Componente imaginária da permeabilidade relativa complexa.

Os valores de ε_r e μ_r são normalizados pelos valores da permissividade e da permeabilidade no espaço livre, ε_0 e μ_0 , respectivamente. As componentes reais das grandezas ε_r' e μ_r' estão relacionadas com a energia armazenada, enquanto a parte imaginária ε_r'' e μ_r'' estão relacionadas com as perdas.

2.2 MATERIAIS ABSORVEDORES DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA - MARE

Os MARE são compostos de materiais com características elétricas e magnéticas específicas. São materiais que absorvem a onda eletromagnética e a convertem em calor devido as estruturas química e física do material que possuem mecanismos internos que convertem a energia da onda. Eles são utilizados na área militar, no revestimento de superfícies externas e internas de aeronaves, em veículos e em embarcações [7]. Na área civil são utilizados na blindagem de salas que utilizam instrumentação eletrônica, fornos micro-ondas, antenas de rádio transmissão entre outras aplicações.

2.2.1 Caracterização da propagação da onda eletromagnética por MARE

Como já foi explicitada, a propagação da onda eletromagnética é dependente da permissividade e permeabilidade relativa do meio. Como, para os absorvedores elétricos os

mecanismos das perdas estão relacionados com a condutividade (σ) do material, é conveniente expressá-los em termos de ϵ_r'' como mostrado na Equação 2.9 [8].

$$\epsilon_r'' = \frac{\sigma}{\omega\epsilon}, \quad (2.9)$$

em que

$\omega \rightarrow$ Velocidade angular [rad/s].

Podendo-se expressar as grandezas físicas na forma polar, como são dadas nas Equações 2.10 e 2.11.

$$\epsilon_r = |\epsilon_r| e^{j\delta}, \quad (2.10)$$

$$\mu_r = |\mu_r| e^{j\delta_m}, \quad (2.11)$$

em que:

$\delta \rightarrow$ Argumento da tangente de perda elétrica;

$\delta_m \rightarrow$ Argumento da tangente de perda magnética.

Os argumentos das tangentes de perdas elétricas e magnéticas são dadas de acordo com as Equações 2.12 e 2.13.

$$\text{tg } \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}, \quad (2.12)$$

$$\text{tg } \delta_m = \frac{\mu_r''}{\mu_r'}, \quad (2.13)$$

O índice de refração do material (n) é a razão entre o número de onda (k) característico da onda que se propaga no interior do material e o número de onda (k_0) característico de propagação da onda no espaço livre, vide Equação 2.14.

$$n = \frac{k}{k_0} = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}, \quad (2.14)$$

em que

$$k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}.$$

As grandezas físicas, permissividade e permeabilidade relativas são utilizadas para definir a impedância intrínseca do material, conforme a Equação 2.15 [3,8,9].

$$Z = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}}, \quad (2.15)$$

em que

$Z_0 = 120\pi = 376,99 \Omega \rightarrow$ Impedância característica do espaço livre.

A impedância intrínseca é o valor notado pela onda eletromagnética de incidência normal no material. Em aplicações práticas, uma camada de material dielétrico está aplicada sobre uma superfície condutora e a impedância normalizada η é dada pela Equação 2.16 [10].

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh(-k_0 d \sqrt{\mu_r \epsilon_r}), \quad (2.16)$$

em que

$d \rightarrow$ Espessura da camada do material dielétrico.

A impedância normalizada pode ser usada para calcular o coeficiente de reflexão R , como mostrado na Equação 2.17 [10]. Sendo R um número complexo com magnitude entre 0 e 1, logo se utiliza misturas de MARE para conseguir uma magnitude de R próxima de 0.

$$\Gamma = \frac{\eta - 1}{\eta + 1}, \quad (2.17)$$

em decibéis tem-se que

$$|\Gamma|_{dB} = 20 \log |\Gamma|. \quad (2.18)$$

2.2.2 Técnicas de atenuação da radiação

A obtenção da atenuação da onda eletromagnética é baseada nas seguintes técnicas: cancelamento de fase da onda incidente, espalhamento da onda em várias direções e utilização de materiais com perdas eletromagnéticas inerentes à faixa de frequência de interesse. Essas técnicas são explicadas a seguir.

a) Cancelamento de fase da onda eletromagnética

O cancelamento de fase da onda eletromagnética é baseado na estrutura de Salisbury que consiste em uma estrutura, onde um material resistivo é montado a uma distância $\lambda_0 / 4$ do comprimento de onda da radiação incidente acima material laminado, conforme apresentado na Figura 2.3. A resistência elétrica desse material é de $120\pi \Omega / \text{m}^2$ (ou $Z_0 = 377 \Omega$). Nesse determinado comprimento de onda, a radiação incidente e a refletida no material se cancelam, promovendo interferência destrutiva. O cancelamento ocorre porque as ondas estão com as fases invertidas de 180° e com a atenuação da onda incidente de 25 a 30 dB [3]. Caso a inversão seja menor que 180° o cancelamento será parcial.

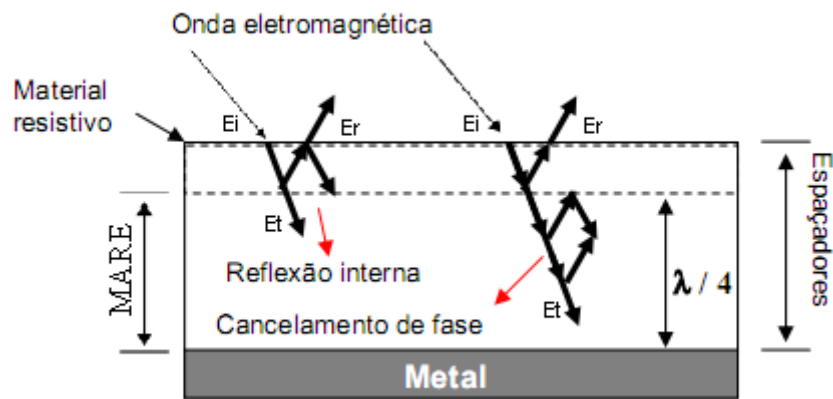


Figura 2.3 – Estrutura de Salisbury. E_i – Intensidade do campo incidente, E_t – Intensidade do campo transmitido, E_r – Intensidade do campo refletido

b) Técnica de espalhamento da onda eletromagnética

A geometria dos absorvedores é um fator importante, pois a atenuação da onda eletromagnética depende da superfície, se é rugosa ou tem nivelamento diferente. Devido à variação nos pontos, mais baixo e mais alto, ocorrem multirreflexões superficiais da onda eletromagnética, logo a onda refletida no plano, é absorvida em outro plano. Desta forma vai a intensidade do campo vai sendo diminuída devido a reflexões superficiais. Um bom exemplo disso são as paredes de uma câmara anecóica, como mostrada na Figura 2.4, e detalhada na Figura 2.5.



Figura 2.4 – Câmara Anecóica [11]

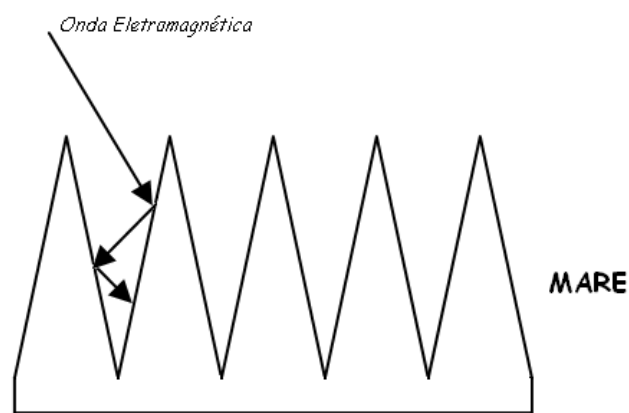


Figura 2.5 – Parede da Câmara Anecóica

c) Utilização de materiais com perdas magnéticas e dielétricas

Essa técnica envolve a atenuação da intensidade do campo da onda eletromagnética incidente pela conversão da energia da onda em calor, no interior do absorvedor. Neste caso, é necessário ajustar a impedância da superfície do absorvedor, de forma que a onda incidente penetre nesse material.

3 METODOLOGIA

Nesta seção são apresentados os materiais e os equipamentos utilizados no trabalho. Os procedimentos relativos a construção das caixas, a escolha da cerâmica utilizada, e a técnica utilizada para medição da atenuação do sinal. A Figura 3.1 mostra o fluxograma às etapas realizadas.

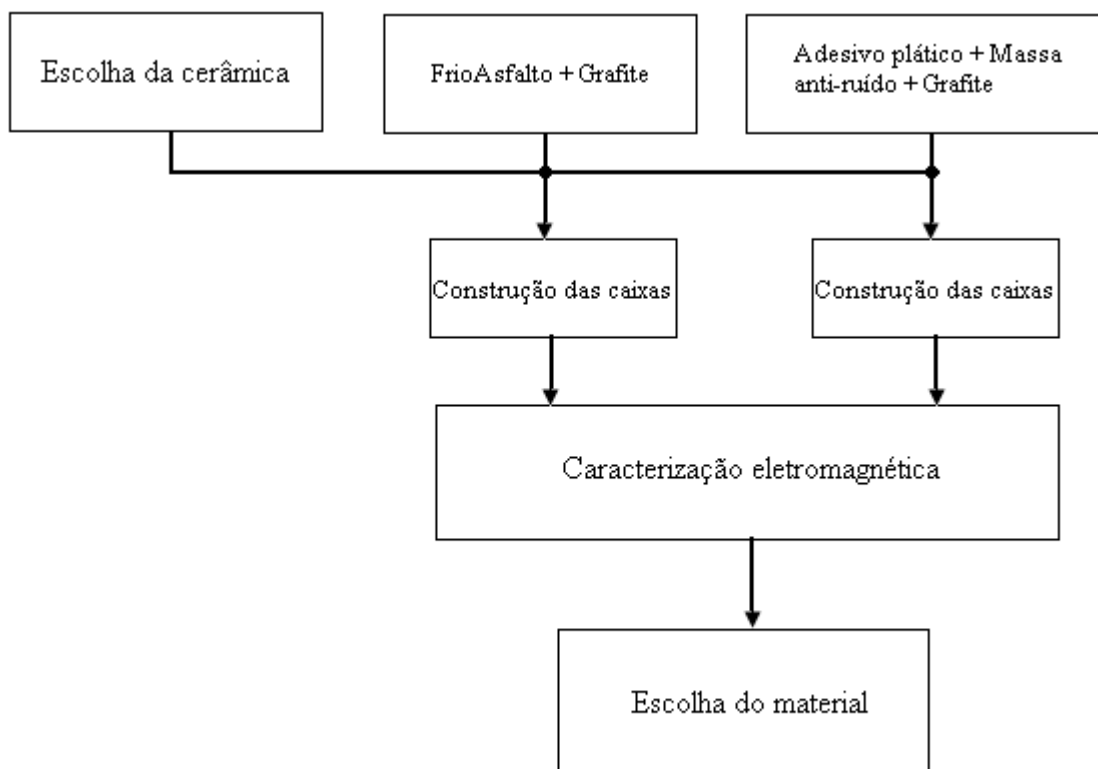


Figura 3.1 – Fluxograma das etapas realizadas neste trabalho

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados foram escolhidos entre os diversos existentes no comércio local, levando em consideração facilidades de se encontrar, de manipulação, preço acessível e absorção eletromagnética resultante.

Para confeccionar as caixas utilizou-se a cerâmica de marca Elizabeth tipo B, por ser uma cerâmica de baixa porosidade e preço acessível. Nos itens subsequentes mostra-se como confeccionar as caixas de prova revestidas pelo conjunto 1 composto de emulsão asfáltica + grafite e pelo conjunto 2 com resina asfáltica + resina de poliéster insaturado + grafite, bem

como os equipamentos e os acessórios utilizados para a caracterização eletromagnética desses materiais.

3.1.1 Caixas sem revestimentos

As caixas foram construídas nas medidas mostradas nos subitens a e b para que fosse conseguida pelo menos metade da atenuação do sinal.

a) Caixa pequena (vide Figura 3.2):

- Cerâmicas da marca Elizabeth, tipo B;
- Medidas internas de aproximadamente (150 x 150 x 150) mm.

b) Caixa grande (vide Figura 3.2):

- Cerâmicas da marca Elizabeth, tipo B;
- Medidas internas de aproximadamente (180 x 180 x 180) mm.

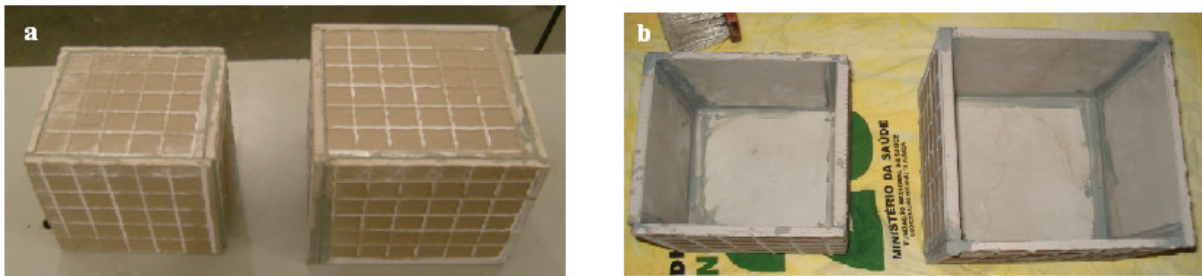


Figura 3.2 – a) Visão em perspectiva; b) Visão superior. Caixas sem revestimento.

3.1.2 Caixas revestidas com o conjunto 1

As caixas foram construídas de maneira semelhante à subseção anterior, a diferença é que foi aplicado o MARE em suas faces da forma mostrada na Figura 3.3.

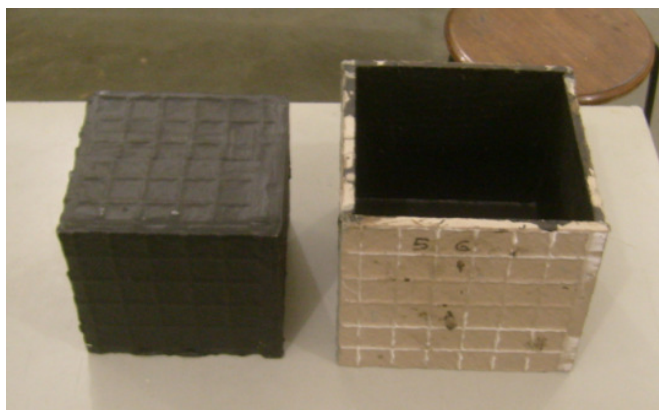


Figura 3.3 – Vista das caixas pequena e grande, revestidas com o conjunto1.

c) Quantidade de material utilizado

- FrioAsfalto (nome comercial para emulsão asfáltica): 1,00 kg;
- Grafite: 6,25 g;
- H₂O: 0,20 ℓ;

3.1.3 Caixas revestidas com o conjunto 2

Construção idêntica ao subitem anterior, contudo a aplicação do MARE é diferente como mostra a Figura 3.6, e o acabamento ficou como mostrado na Figura 3.4..



Figura 3.4 – Caixas pequena e grande revestidas como conjunto2.

c) Quantidade de material utilizado:

- Massa Anti-Ruído (nome comercial para resina asfáltica): 1 ℓ;
- Grafite: 2,15 g;
- Adesivo plástico (nome comercial para resina de poliéster insaturada): 0,80 kg;
- Catalisador massa fix: 9,00 g.

3.1.4 Caracterização da Absorção Eletromagnética

A caracterização dos materiais foi feita utilizando os seguintes equipamentos:

- a) Medidor de campo elétrico tipo MG-626, marca PROMAX;
- b) Sonda tipo PRO6H;
- c) Fibra óptica;
- d) Conversor óptico;
- e) *Notebook*;
- f) *Software* para salvar as leituras do MG-626, da PROMAX;
- g) Celular tipo A52 marca Siemens;
- h) *Talkabout* tipo T5900, marca Motorola;
- i) Papel alumínio.

3.1.5 Custo de produção das caixas

A Tabela 3.1 mostra o custo total da confecção dos MARE das caixas.

		Custo (R\$ 1,00)
Conjunto 1	Grafite	0,65
	FrioAsfalto	7,20
	Total (R\$)	7,85
Conjunto 2	Grafite	0,30
	Plástico Adesivo	6,40
	Massa Anti-Ruído	7,50
	Total (R\$)	14,20

Tabela 3.1 – Custo de fabricação dos revestimentos das caixas

3.2 MODO DE PREPARAÇÃO DAS CAIXAS

Para construção dos lados das caixas foi utilizada a cerâmica Elizabeth tipo B, e para fixação das faces utilizou-se epóxi.

3.2.1 Caixas com camadas de materiais do conjunto 1

a) Caixa pequena (vide Figura 3.5):

- Aplicação do revestimento externamente:
 - i. 1ª Camada: FA + 20 % H₂O (espessura: 2 mm);
 - ii. 2ª Camada: grafite (espessura: 0,5 mm);
 - iii. 3ª Camada: FA + 20 % H₂O + grafite (espessura: 2,5 mm);
 - iv. 4ª Camada: FA (espessura: 3 mm).

b) Caixa grande (vide Figura 3.5):

- Aplicação do revestimento interno:
 - i. 1ª Camada: FA + 20 % H₂O (espessura: 2 mm);
 - ii. 2ª Camada: grafite (espessura: 0,5 mm);
 - iii. 3ª Camada: FA + 20 % H₂O + grafite (espessura: 2,5 mm);
 - iv. 4ª Camada: FA (espessura: 3 mm);

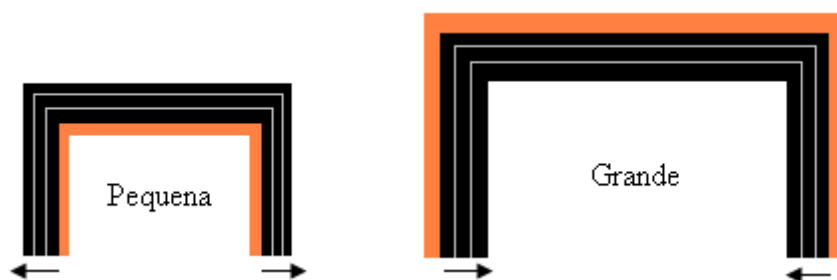


Figura 3.5 - Sentido de aplicação das camadas. Os materiais são representados pelas cores: (■) cerâmica; (■) FrioAsfalto e (■) grafite.

Os materiais absorvedores foram aplicados dessa forma para simular duas paredes seguindo a seguinte seqüência: camada do conjunto 1 + camada de ar + camada do conjunto 1. Isto é obtido quando se coloca a caixa pequena no interior da grande.

3.2.2 Caixas com camadas de materiais do conjunto 2

a) Caixa pequena (vide Figura 3.6):

- Aplicação do revestimento externamente:
 - i. 1ª Camada: Massa Anti-ruído + grafite (espessura: 2,5 mm);
 - ii. 2ª Camada: Massa Anti-ruído + grafite (espessura: 2,5 mm);
 - iii. 3ª Camada: Massa Anti-ruído + grafite (espessura: 2,5 mm);
 - iv. 4ª Camada: Adesivo plástico + catalisador massa fix;

b) Caixa grande (vide Figura 3.6):

- Aplicação do revestimento
 - Interno:
 - i. 1ª Camada: Massa Anti-ruído + grafite (espessura: 2,5 mm);
 - ii. 2ª Camada: Massa Anti-ruído + grafite (espessura: 2,5 mm);
 - iii. 3ª Camada: Massa Anti-ruído + grafite (espessura: 2,5 mm);
 - Externo:
 - i. 1ª Camada: Adesivo plástico + catalisador massa fix;

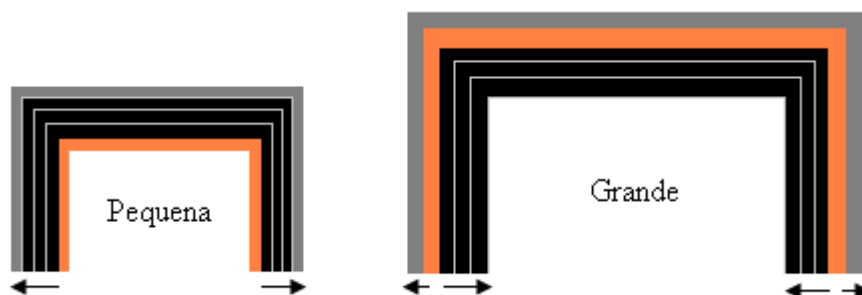


Figura 3.6 – Sentido de aplicação das camadas. Os materiais são representados pelas cores:

(■) cerâmica; (■) massa anti-ruído; (■) grafite e (■) adesivo plástico.

3.3 MEDIÇÕES

As medições foram realizadas no Laboratório RNI (LabRNI) que é vinculado ao Instituto de Estudos Avançados em Comunicação (Iecom), localizado no Centro de Ciências Biológicas e da Saúde (CCBS) da Universidade Federal de Campina grande.

Para iniciar as medições foi calculado o valor do comprimento de onda do celular, que opera em 1800 MHz, e do *Talkabout*, com frequência de 462,5625 MHz, conforme o mostrado abaixo:

$$\text{Para o celular: } \lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,8 \cdot 10^9} = 0,1667\text{m}$$

$$\text{Para o Talkabout: } \lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{462,56 \cdot 10^6} = 0,6485\text{m}$$

Sabendo destes comprimentos de onda, o aparelho MG-626, juntamente com a sonda, foi posto a uma distância de 0,25 m do local da medição, garantindo que a sonda ficou situada na região de campo distante para ambas as frequências, apesar de que as paredes das caixas já estarem situadas fora da região de campos próximos das ondas emitidas pelos equipamentos. No esquema da Figura 3.5 mostra o medidor de campo medindo a atenuação sofrida pela onda ao passar pelo MARE.

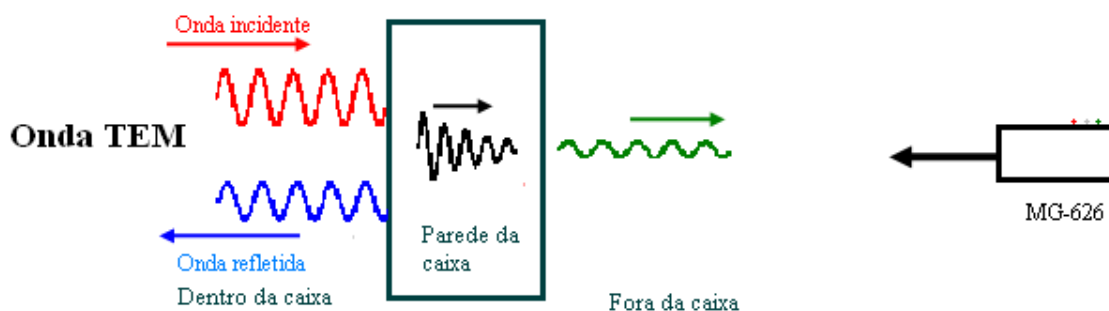


Figura 3.5 – Atenuação sofrida pela onda ao passar pelo MARE

3.3.1 Configuração para medições feitas para o celular

O celular de teste foi colocado em uma folha de papel alumínio e coberto com uma caixa, de forma que o aparelho ficasse no centro dela. A distância do celular para as paredes

da caixa pequena foi $\frac{\lambda}{2,2}$ e para a grande $\frac{\lambda}{2}$. Depois o MG-626 foi posicionado, conforme mostrado na Figura 3.6.

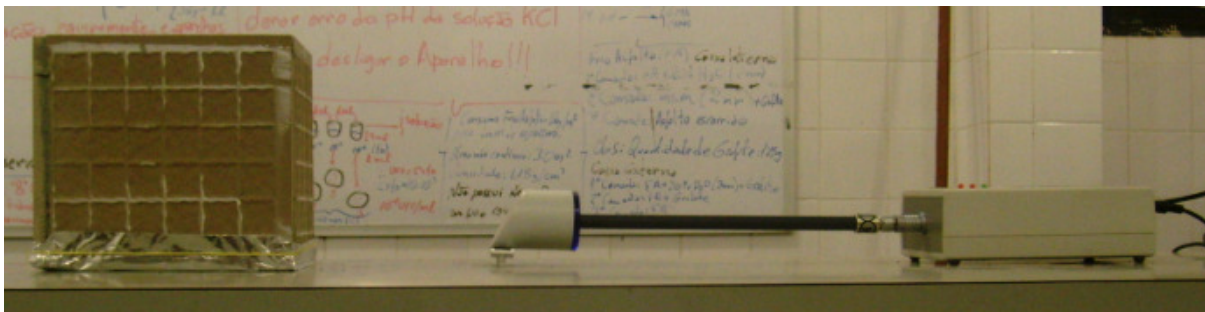


Figura 3.6 – Forma de medição da absorção para a frequência do celular

O operador ficava fora do laboratório, para não gerar interferência, ligando para o celular de teste, e monitorando as medidas por meio do computador. Foram feitas 30 chamadas, que gerou um tempo de aproximadamente 24 minutos de medição. Esse processo foi repetido para todas as caixas construídas.

3.3.2 Configuração para medições feitas para o *Talkabout*

O *Talkabout* foi fixado embaixo da mesa, de modo que a antena ficava dentro da caixa, o botão foi amarrado de forma que permanecer pressionado e transmitindo durante o experimento, e o pesquisador estava monitorando as medidas através do computador, conforme mostra a Figura 3.7. O tempo total de medição ficou em torno de 24 minutos.



Figura 3.7 – Posicionamento dos equipamentos para medição com o *Talkabout*

4 RESULTADOS

Foram feitas medidas da intensidade do campo elétrico do celular e do *Talkabout* sem nenhum tipo de revestimento, os sinais coletados são mostrados no Anexo 1. Utilizando-os como referência, os demais (vide Anexo 1) foram comparados com eles para mostrar se os materiais aplicados nas caixas estavam realmente atenuando ou amplificando o sinal.

Os gráficos das Figuras 4.1, 4.2, 4.3, e 4.4 apresentam a atenuação encontrada pelas medidas experimentais das caixas pequenas e grandes dos dois conjuntos de materiais estudados, tomando como base a medida do campo elétrico dos equipamentos sem caixa. O experimento foi realizado com 30 eventos, ou seja, 24 minutos de duração, contudo foi feita uma estimativa para 300 eventos, isto é, estimando que cada medição do experimento tivesse um tempo total de 240 minutos.

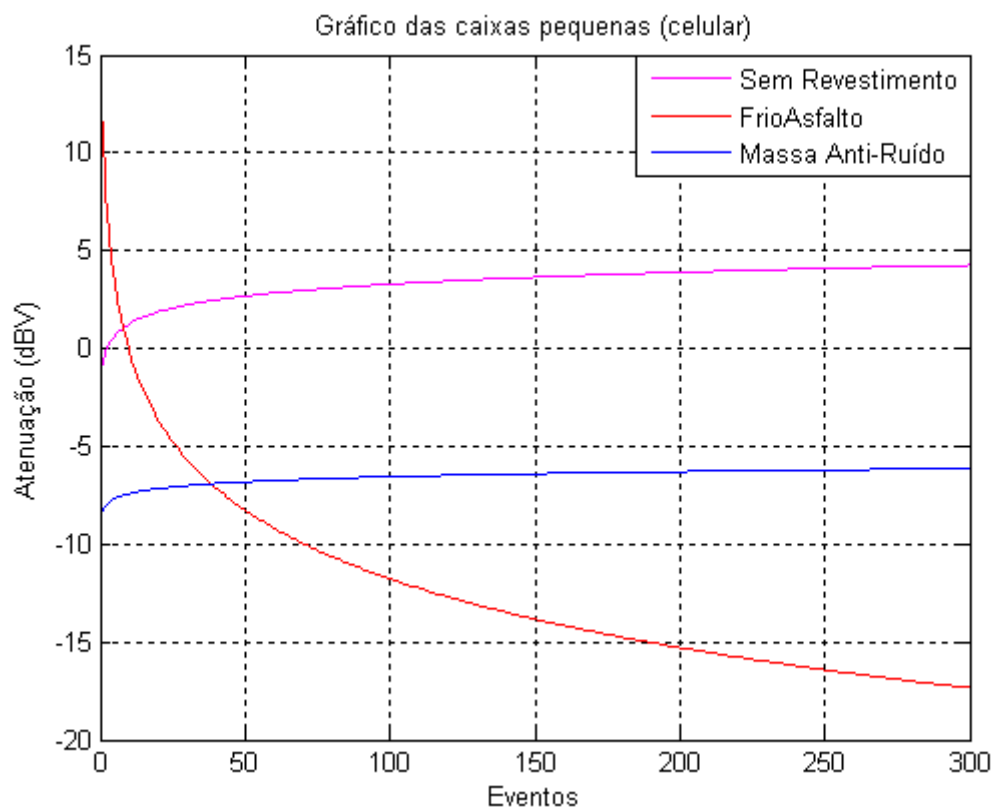


Figura 4.1 – Medida experimental da atenuação das caixas pequenas para o celular

Na Figura 4.1 é verificado que tanto para o FrioAsfalto, quanto para a massa Anti-Ruído, obteve-se atenuação acima de 50%, sendo o FrioAsfalto melhor atenuador para a frequência de 1800 MHz. Já na Figura 4.2, o melhor atenuador é a caixa sem revestimento, ou seja, apenas a cerâmica como material absorvedor. Todavia os dois conjuntos de materiais conseguiram atenuar mais da metade do sinal.

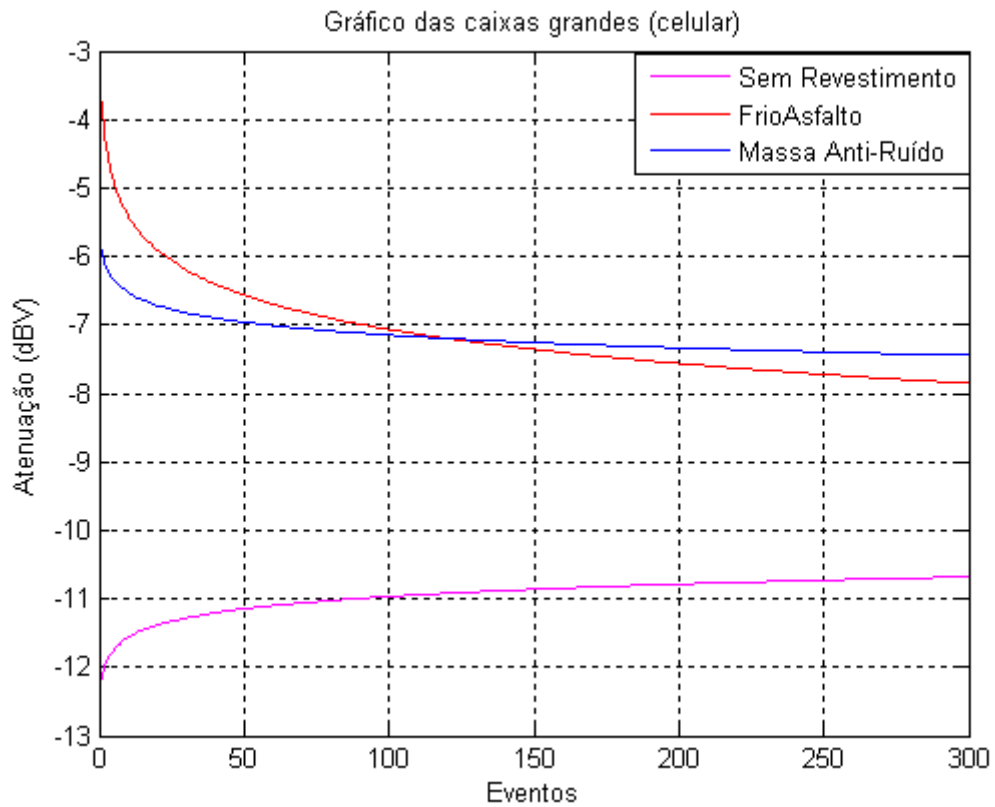


Figura 4.2 – Medida experimental da atenuação das caixas grandes para o celular

Para a frequência de 462,56 MHz, pertencente ao *Talkabout*, a Figura 4.3 mostra que para a caixa pequena todos os materiais atenuaram o sinal, porém apenas a massa anti-ruído conseguiu atenuar mais da metade do sinal. Já na caixa grande o FrioAsfalto atenua cerca de 50 % do sinal, e os outros materiais ampliaram.

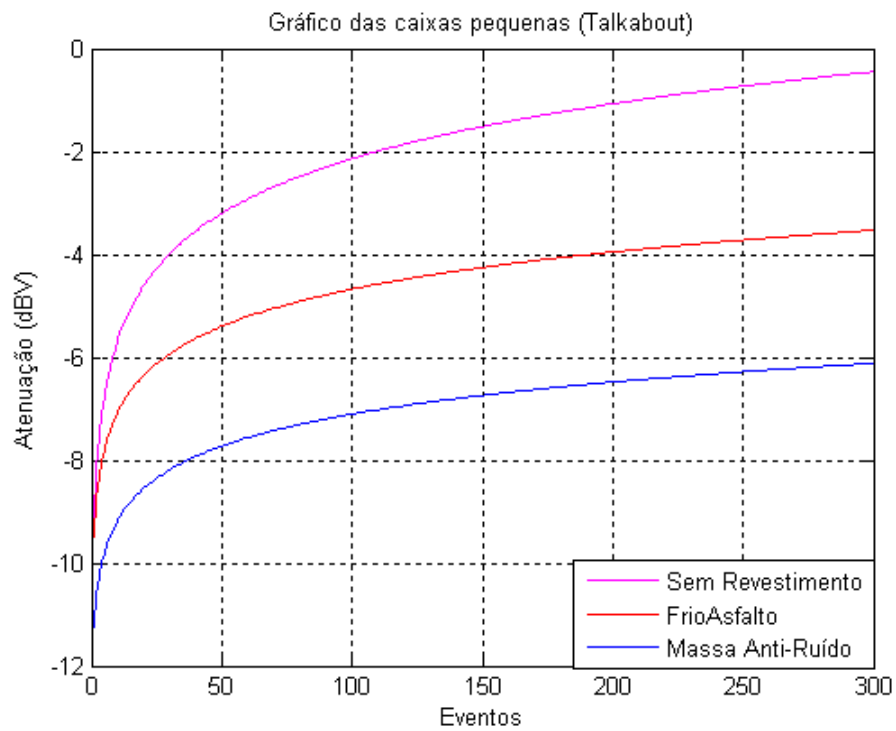


Figura 4.3 – Medida experimental da atenuação das caixas pequenas para o *Talkabout*

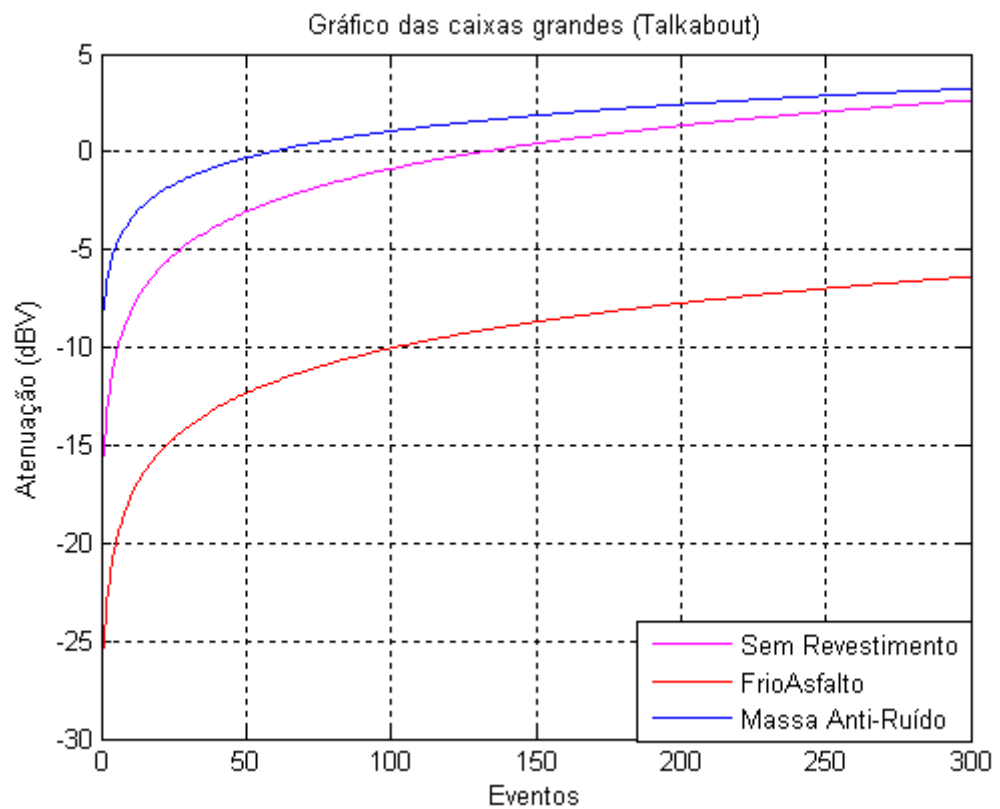


Figura 4.4 – Medida experimental da atenuação das caixas grandes para o *Talkabout*

Na Tabela 4.1 podem ser conferidos os valores das atenuações para os eventos 30 e 300. Esses valores mostram que para frequência de 1800 MHz do celular, quanto para a 462,56 MHz do *Talkabout*, o melhor conjunto MARE foi do conjunto 1, pois obteve as melhores atenuações com relação à caixa grande.

Caixa-aparelho	n° do evento	Atenuação (dBV)		
		Sem Revestimento	Com FrioAsfalto	Massa Anti-Ruído
pequena_celular	30	2,285	-5,6805	-7,0059
	300	4,2559	-17,3468	-6,1379
grande_celular	30	-11,2803	-6,2005	-6,8232
	300	-10,6793	-7,8533	-7,4438
pequena_Talkabout	30	-3,9914	-5,9319	-8,1863
	300	-0,4472	-3,5296	-6,1163
grande_Talkabout	30	-4,7067	-14,046	-1,3231
	300	2,6321	-6,3791	3,2296

Tabela 4.1 – Valores das atenuações para os eventos 30 e 300

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir dos gráficos das atenuações verifica-se a estabilização no sinal após o evento 50. Antes desse evento, possivelmente as moléculas dos materiais estavam agitadas devido à onda eletromagnética incidente no início da medição. Após se estabilizarem, a onda refletida ficou atuando destrutivamente em algumas caixas e em outras o sinal refletivo estava sendo somado à onda incidente.

Verificou-se que na caixa grande revestida com o material do conjunto 1 obtive a melhor atenuação em relação aos mesmo tipo de caixa para o conjunto 2, já para a pequena, o conjunto 2 teve os melhores resultados.

Tomando como base a caixa grande revestida com o conjunto 1 foi projetada uma caixa com medidas internas 60 cm x 60 cm x 60 cm, com uma antena dipolo fixada no centro da uma das faces, como mostrado na Figura 4.5.

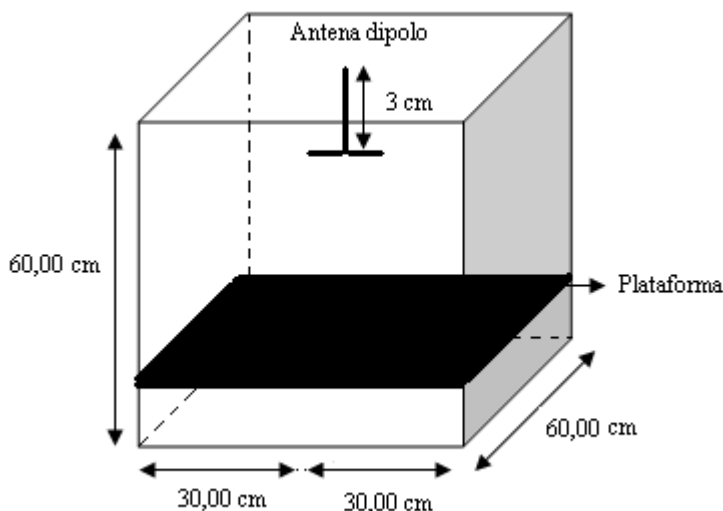


Figura 4.5 – Medidas interna da caixa projetada

Para essa caixa projetou-se uma plataforma móvel, que é revestida com o absorvedor escolhido, e há pontos onde se pode fixá-la de forma a variar apenas a potência utilizada. A seguir são mostrados esses pontos de acordo com a frequência utilizada.

- **1,80 GHz:**

Comprimento de onda: $\lambda = 16,67$ cm;

Raio da antena : $\frac{\lambda}{4} = 4,16$ cm;

Os melhores pontos com relação à altura onde a plataforma pode ser fixada estão indicados na Figura 4.6. Sabendo que os pontos onde a bandeja é colocada, a onda incidirá com aproximadamente $\frac{\lambda}{2}$ e nas paredes laterais incidirá com $\frac{\lambda}{1,2}$. Em que: A é a Antena e P é a distância da plataforma a antena.

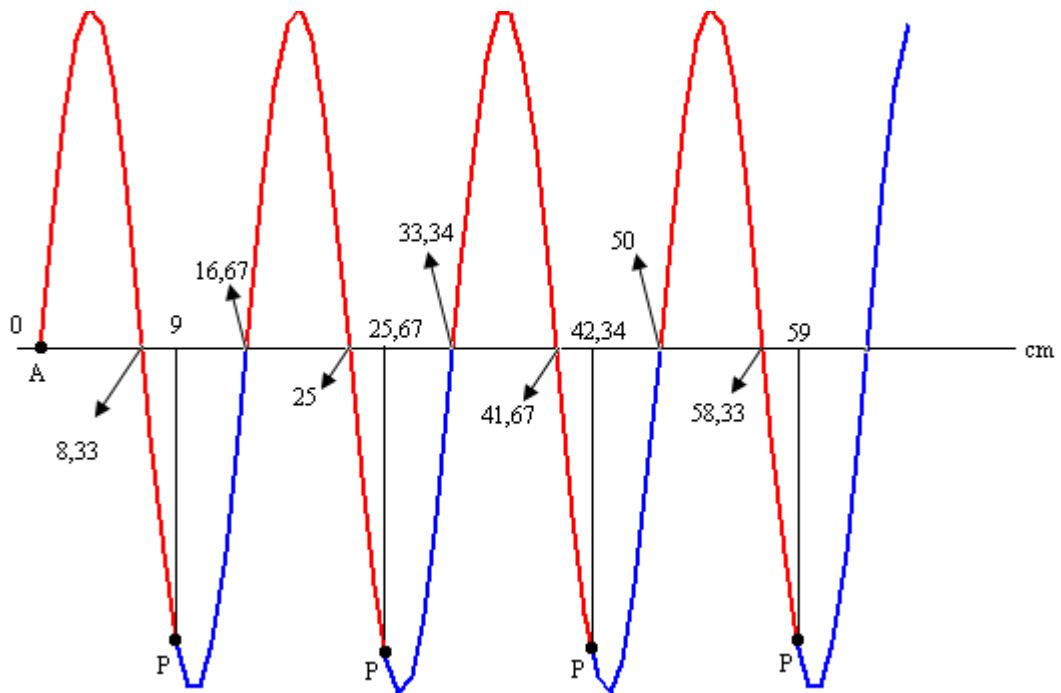


Figura 4.6 – A cor vermelha indica o quanto a onda percorrerá até atingir a placa (1,80 GHz)

- **462,56 MHz:**

Comprimento de onda: $\lambda = 64,85$ cm;

Raio da antena : $\frac{\lambda}{4} = 16,21$ cm;

Os melhores pontos com relação à altura onde a plataforma pode ser fixada estão indicados na Figura 4.7. Sabendo que os pontos onde a bandeja é colocada, a onda incidirá com aproximadamente $\frac{\lambda}{7}$ e nas paredes laterais incidirá com $\frac{\lambda}{2}$;

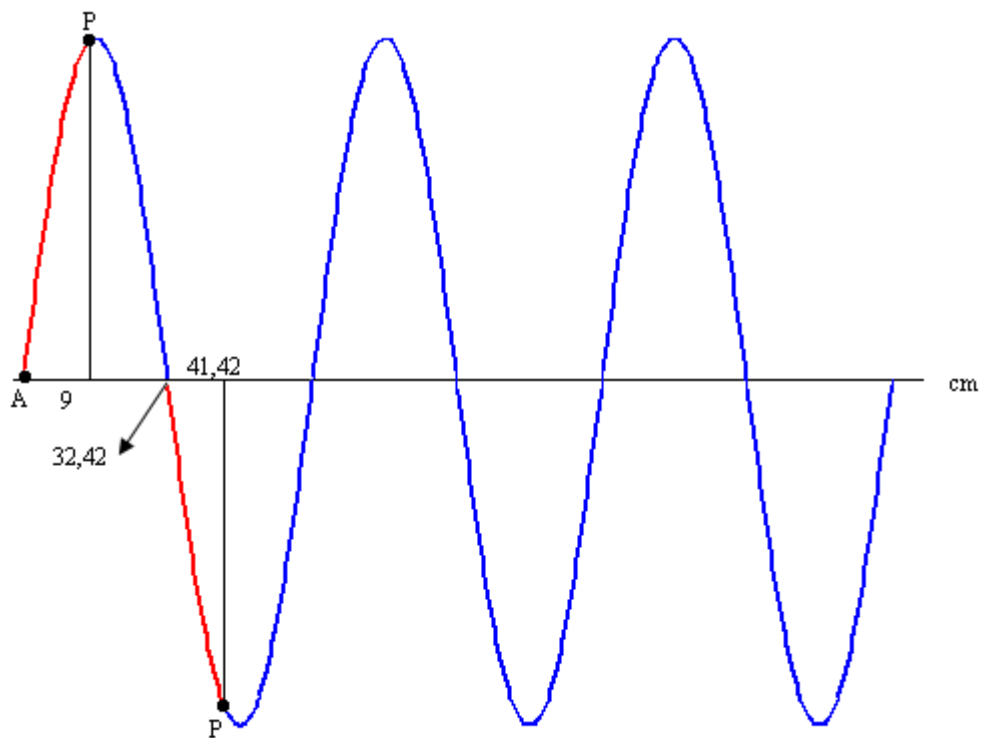


Figura 4.6 – A cor vermelha indica o quanto a onda percorrerá até atingir a placa (462,56 MHz)

O gasto com o revestimento da nova caixa e de sua plataforma está mostrado na Tabela 5.1.

		Quantidade	Custo (R\$ 1,00)
Plataforma	FrioAsfalto	1,31 Kg	9,45
	Grafite	11,54 g	1,20
Total (R\$)			10,65
Caixa	FrioAsfalto	6,55 Kg	47,25
	Grafite	57,70 g	6,00
Total (R\$)			53,25
Custo total do revestimento (R\$)			63,90

Tabela 5.1 – Custo para o revestimento da nova caixa e sua plataforma

6 CONCLUSÃO

A eficiência da blindagem depende da combinação dos materiais e de como são aplicados. A melhor formulação foi obtida com atenuação da radiação em torno de -6,5 dBV para o conjunto 1 combinado com a aplicação interna na caixa grande. Esse comportamento deve-se, possivelmente, à composição química e ao posicionamento dos átomos no retículo cristalino, gerando um composto com menor valor de permeabilidade magnética e MARE com impedância mais próxima a impedância do ar (377Ω). Outro ponto verificado neste trabalho é a viabilidade da utilização de materiais facilmente encontrados no comércio para serem utilizados como absorvedores, assim diminuindo o custo final do projeto. Eles podem ser utilizados na construção de câmaras anecóicas mais baratas, como também na blindagem sistemas sensíveis à EMI, e em salas de hospitais, que podem ser protegidas da radiação eletromagnética. O projeto da caixa com plataforma móvel serviu como base para a construção de uma estufa revestida com o MARE avaliado. Ela está sendo utilizada para o desenvolvimento da tese de doutorado de Fausy Solino Dias, intitulada “Estudo do Efeito da RNI sobre Seres Unicelulares”.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Pesquisar novos materiais que sejam bons absorvedores encontrados facilmente no comércio, e possam ser utilizados na construção de uma câmara anecóica;
2. Fazer um levantamento de materiais que possam servir como atenuadores, que sejam baratos e encontrados no comércio local;
3. Realizar a caracterização eletromagnética da emulsão asfáltica para frequências acima de 1,80 GHz.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GAMA, A. M.; MOURA, A.; REZENDE, M. C. **Efeito da espessura na refletividade de materiais absorvedores de radiação eletromagnética.** In: 510 Congressos Brasileiro de Cerâmica, Salvador, 2007.
- [2] FERREIRA, P. I. L. ROCHA, J. S. **Caracterização de materiais absorvedores de radiação eletromagnética,** Estudo apresentado na Centro de Engenharia Elétrica da UFCG, Campina Grande, 2008
- [3] NEELAKANTA, P. S. **Handbook of Eletromagnetic Materials – Monolithic and Composite Versions and Their Applications,** Publishers 1995
- [4] GAMA, A. M.; MOURA, A.; REZENDE, M. C. **Desenvolvimento de materiais absorvedores de radiação eletromagnética à base de ferro carbonila e silicone.** In: VIII Simpósio de Guerra Eletrônica, São José dos Campos, 2006.
- [5] HAYT, W. H.; BUCK, J. A. **Eletromagnetismo.** Rio de Janeiro, RJ: LTC Editora S.A. cap. 2, 4 e 10. Sexta Edição. 2003.
- [6] EDMINISTER, J. A. **Eletromagnetismo.** São Paulo: Mc-Graw-Hill do Brasil, cap. 13 e 14. 1980.
- [7] GAMA, A. M.; REZENDE, M. C; MIQUELIM, T. F. **Estudo da influência dos parâmetros concentração de ferro carbonila e espessura em medidas de refletividade de MARE.** USP-Lorena; ITA; IAE
- [8] Revista de Física Aplicada e Instrumentação, vol. 18, n°.01, Março, 2005.
- [9] Pereira, J. J. **Caracterização eletromagnética de materiais absorvedores de micro-ondas via medidas de permissividade e permeabilidade complexas na banda x.** Tese de Mestrado. Universidade de Taubaté, São Paulo, 2007.
- [10] Revista de Telecomunicações, vol. 05, n° 02, Dezembro, 2002.
- [11] Universidad de Valladolid, E. T. S. I. Telecomunicación. Ingeniería de Ondas, **Fenômenos Acústicos a través Del Csound.** Disponível em: http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_03_04/Csound/Imagenes/ecos_camara_anecoica.jpg Acesso em: 21 set. 2009

BIBLIOGRAFIA

- [1] Valle, R. R. M. **Fundamentos de antenas (um curso introdutório)**, UFPB Editora Universitária.
- [2] FOLGUERAS, L. C.; REZENDE M. C. **Material absorvedor de radiação eletromagnética multicamadas processado a partir de nãotecidos poliméricos e polímero condutor**. In 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 15 a 19 de Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.
- [3] Fontgalland, G. **Compatibilidade Eletromagnética, Conceito e Definições**. Apresentação de Power Point. Fornecida pelo Professor G. Fontgalland. Em: set 2008, 36p.

ANEXO 1

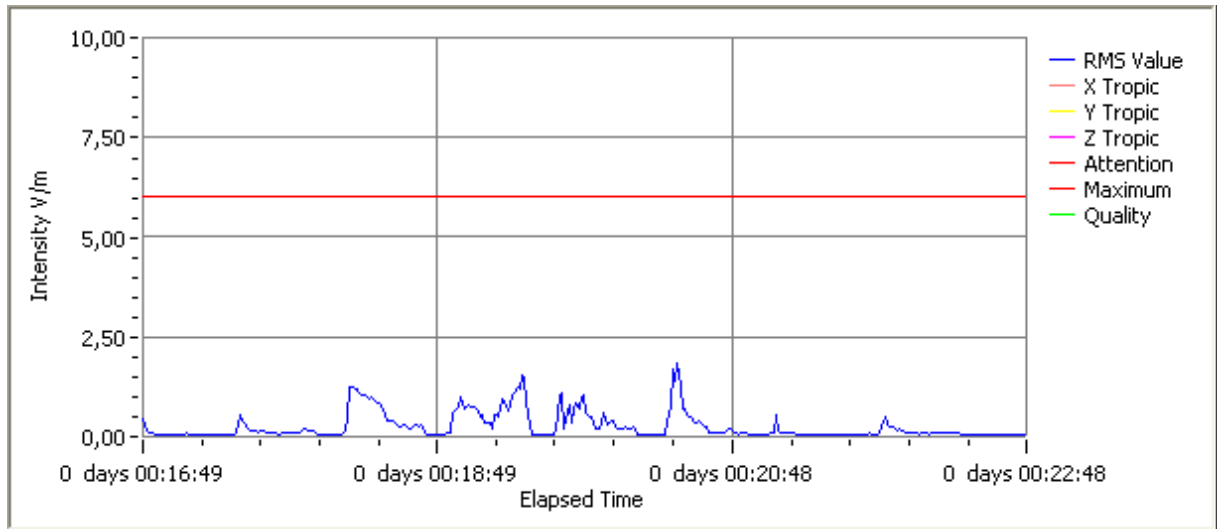


Figura A – 1.1 Sinal do coletado do celular sem nenhum MARE

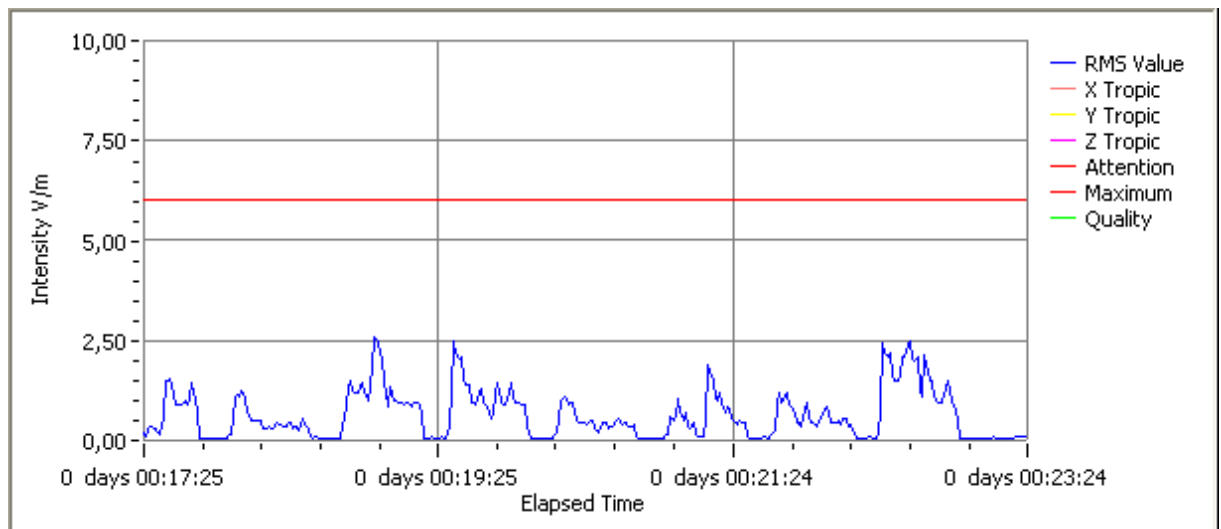


Figura A – 1.2 Sinal do coletado do celular com a caixa pequena sem revestimento

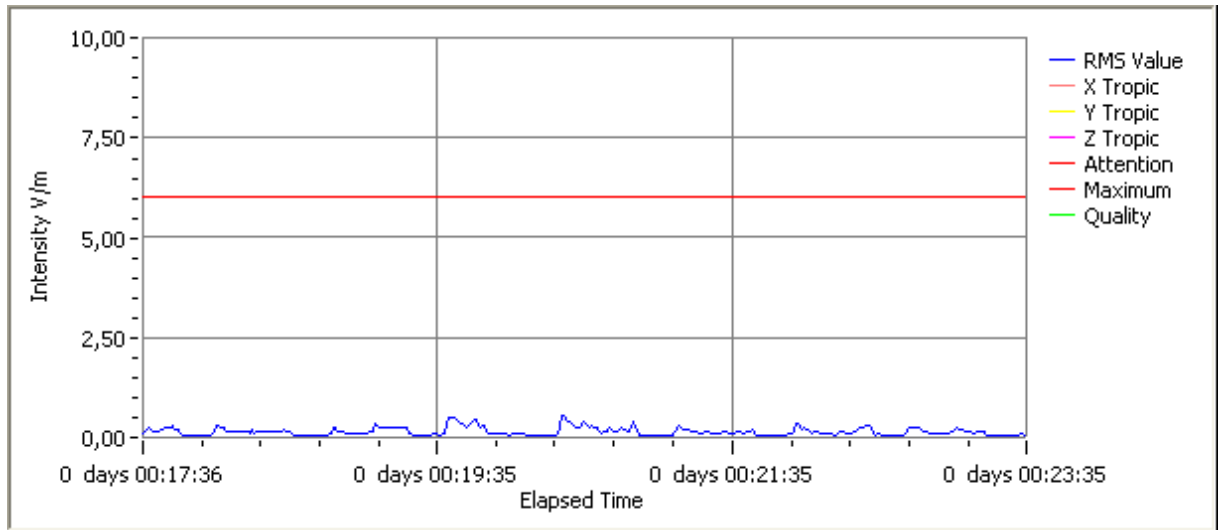


Figura A – 1.3 Sinal do coletado do celular com a caixa grande sem revestimento

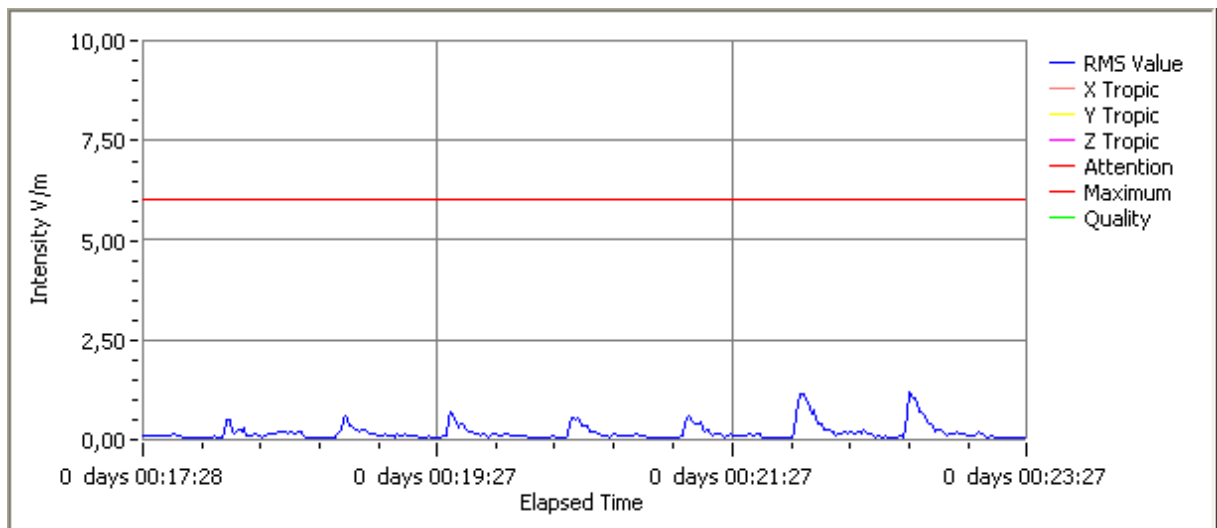


Figura A – 1.4 Sinal do coletado do celular com a caixa pequena com revestimento de FrioAsfalto

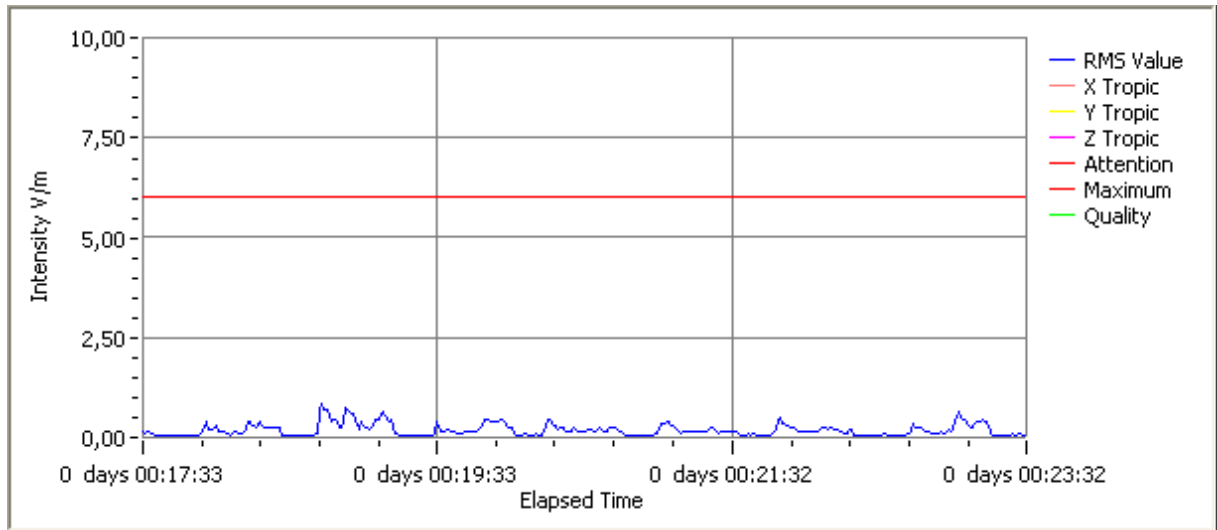


Figura A – 1.5 Sinal do coletado do celular com a caixa grande com revestimento de FrioAsfalto

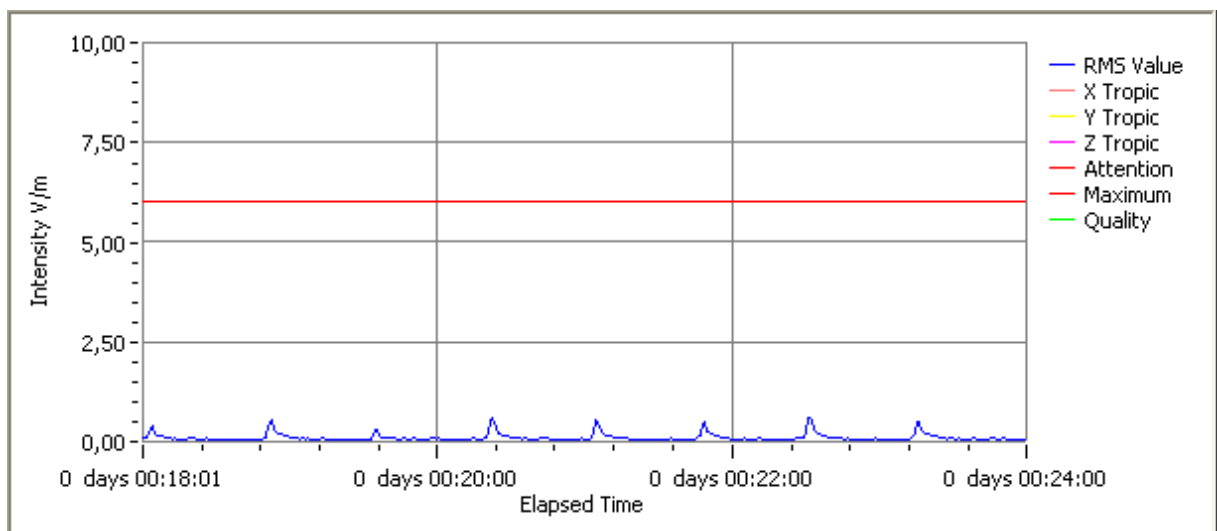


Figura A – 1.6 Sinal do coletado do celular com a caixa pequena com revestimento de Massa Anti-Ruído

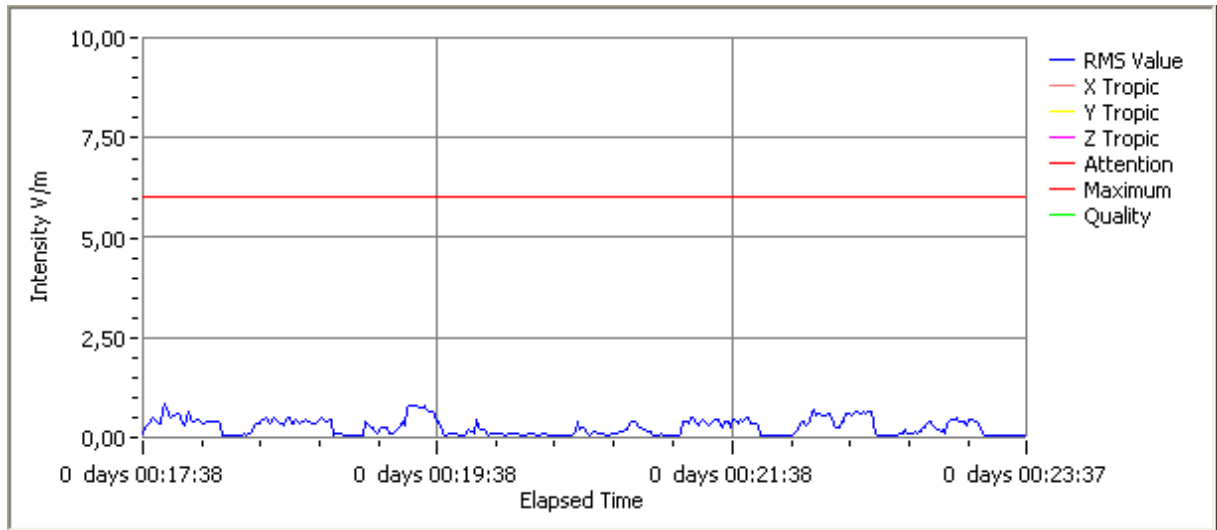


Figura A – 1.7 Sinal do coletado do celular com a caixa grande com revestimento de Massa Anti-Ruído

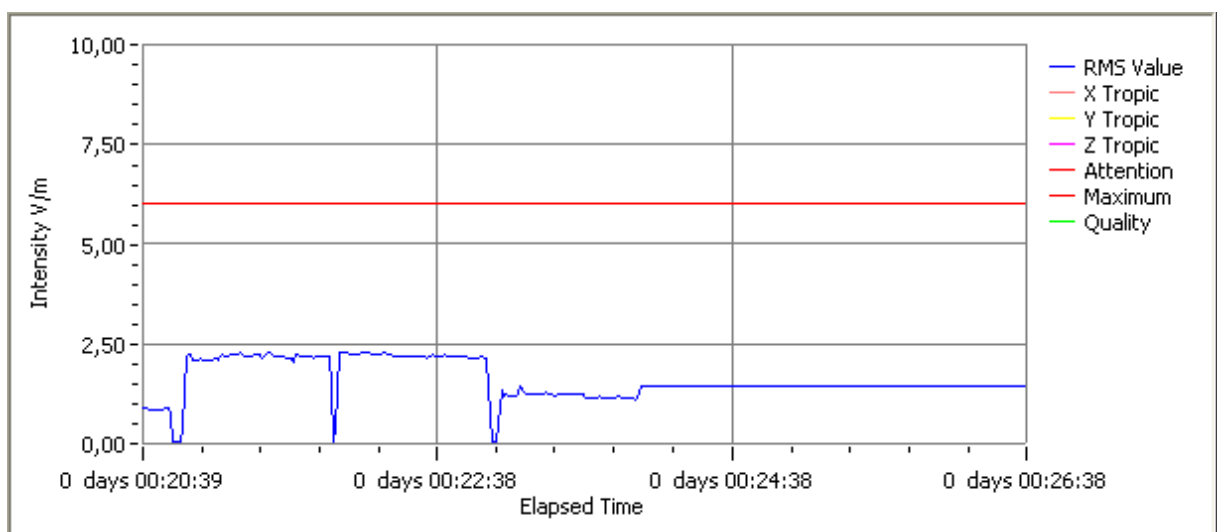


Figura A – 1.8 Sinal do coletado do *Talkabout* sem nenhum MARE

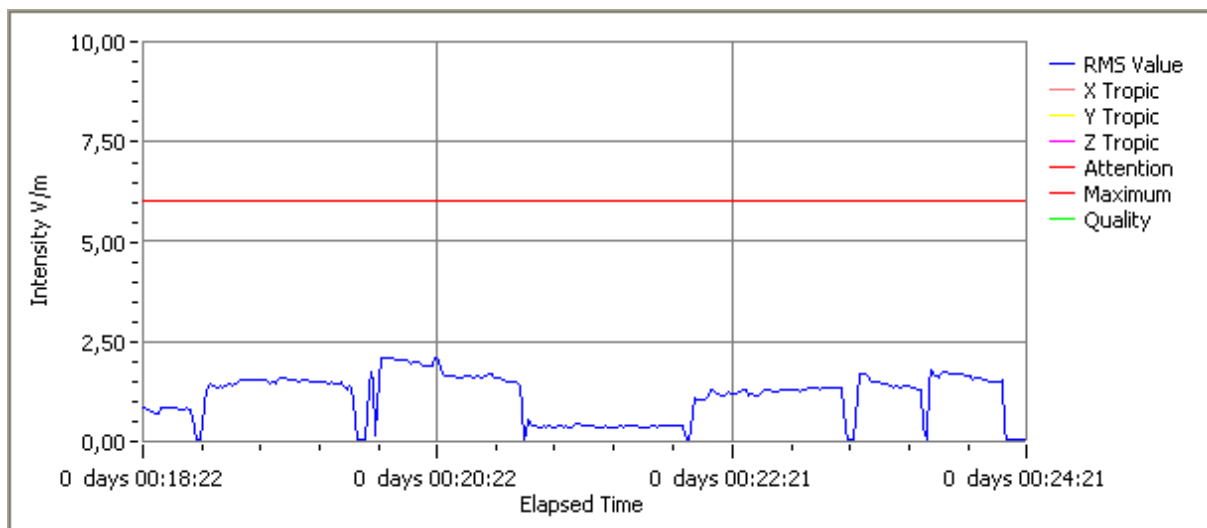


Figura A – 1.9 Sinal do coletado do *Talkabout* com a caixa pequena sem revestimento

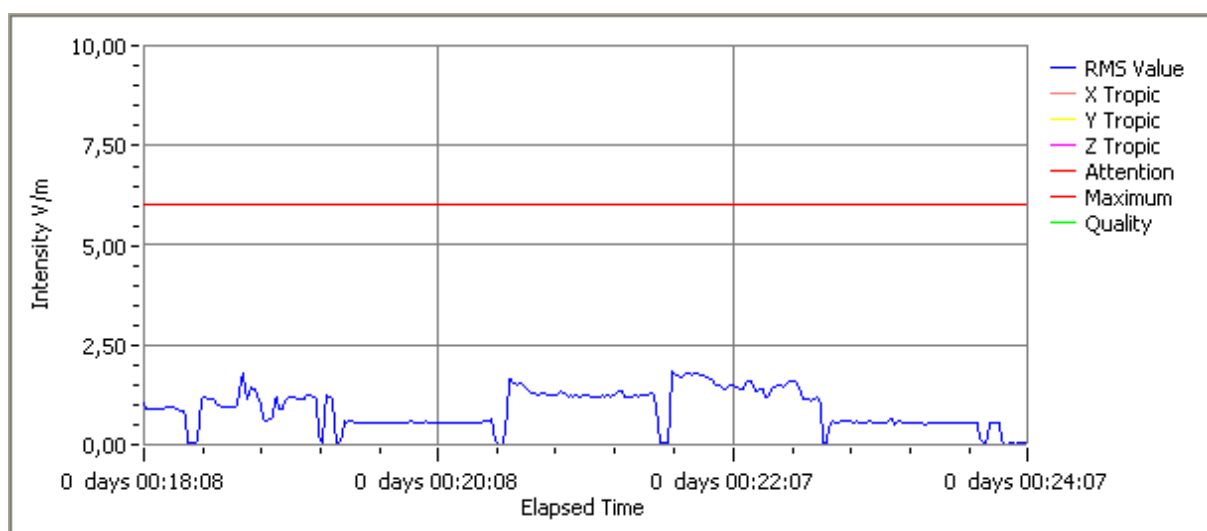


Figura A – 1.10 Sinal do coletado do *Talkabout* com a caixa grande sem revestimento

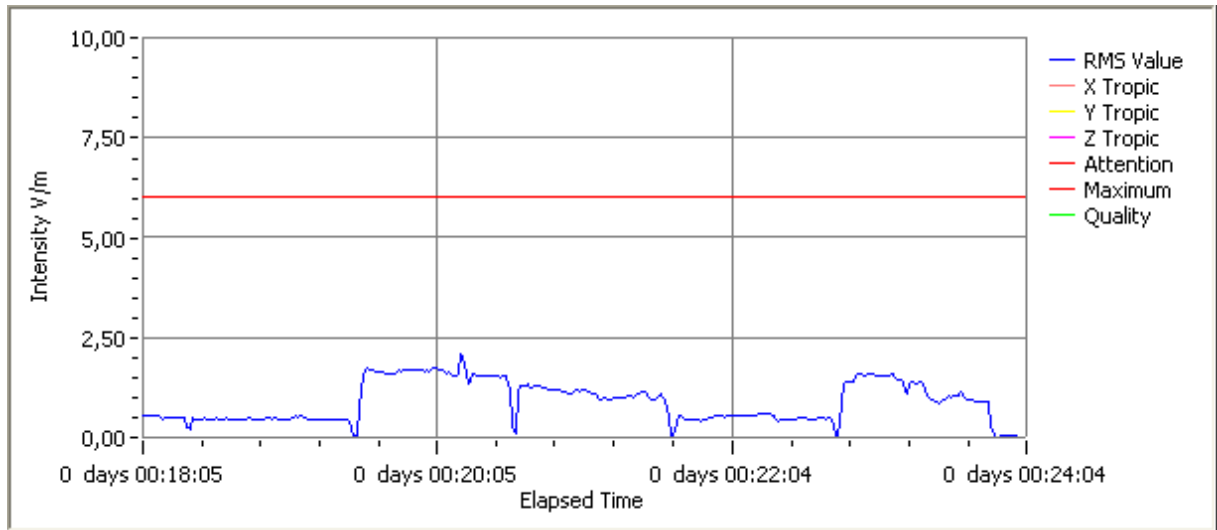


Figura A – 1.11 Sinal do coletado do *Talkabout* com a caixa pequena com revestimento de FrioAsfalto

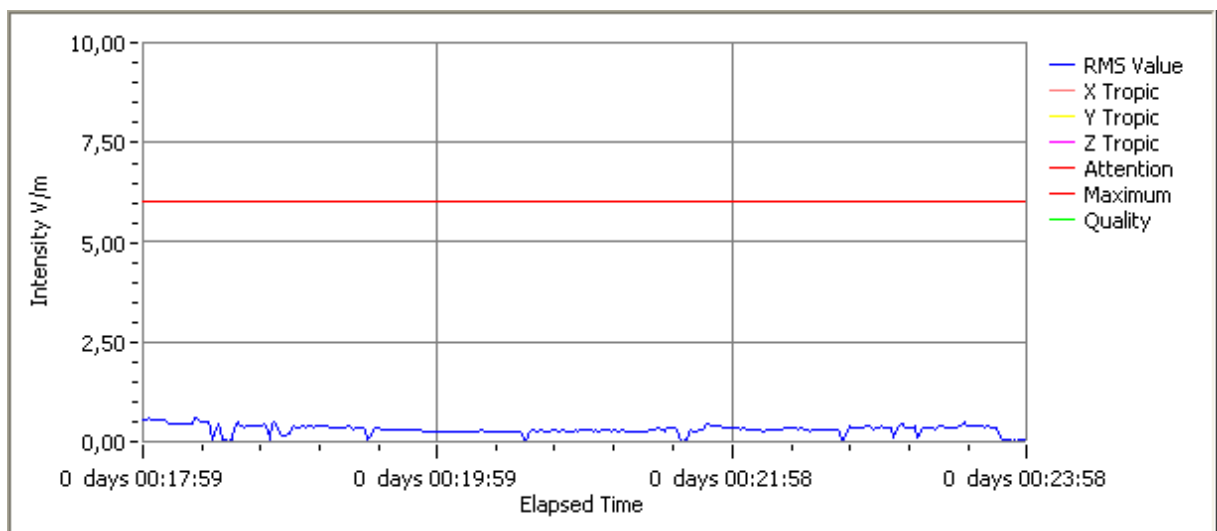


Figura A – 1.12 Sinal do coletado do *Talkabout* com a caixa grande com revestimento de FrioAsfalto

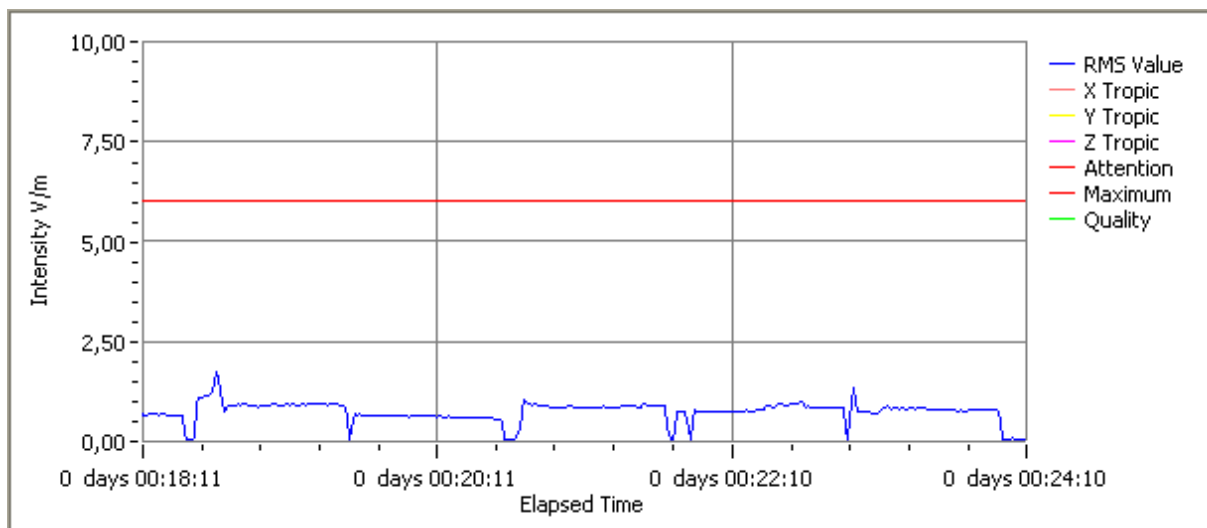


Figura A – 1.13 Sinal do coletado do *Talkabout* com a caixa pequena com revestimento de Massa Anti-Ruído

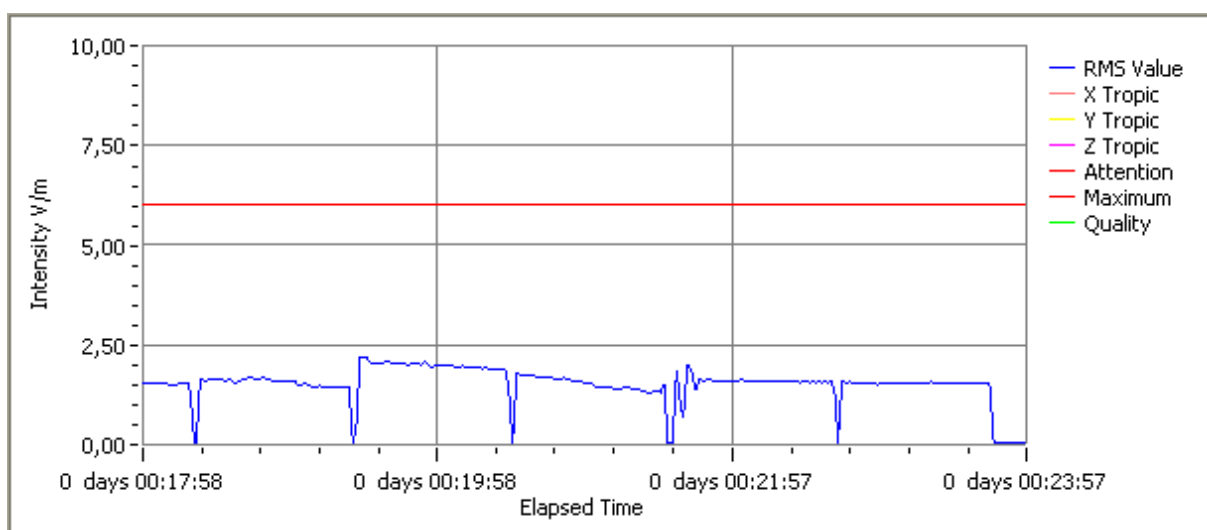


Figura A – 1.14 Sinal do coletado do *Talkabout* com a caixa grande com revestimento de Massa Anti-Ruído