**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**
**FACULDADE DE GEOFÍSICA**
**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**ODINEI DA SILVA MATOS JUNIOR**

# Modelagem e levantamento GPR em estruturas de concreto com antena de 400 MHz.

**Belém - Pará**
**2009**

**ODINEI DA SILVA MATOS JUNIOR**

# Modelagem e levantamento GPR em estruturas de concreto com antena de 400 MHz.

Trabalho de Conclusão do Curso GEOFISICA apresentado à Faculdade de Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, em cumprimento às exigências para a obtenção de grau de bacharel em Geofísica.
Orientador: Cícero Roberto Teixeira Régis.

**Belém - Pará**
**2009**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão

M433m Matos Junior, Odinei da Silva

Modelagem e levantamento GPR em estruturas de concreto com antena de 400 MHz. / Odinei da Silva Matos Junior; Orientador: Cícero Roberto Teixeira Régis – 2010

55 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geofísica) – Faculdade de Geofísica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, Quarto Período de 2009.

1.GPR. 2. Antena. 3. Reflexw. 4. Software. 5. Engenharia civil. I. Universidade Federal do Pará. II. Régis, Cícero Roberto Teixeira, *orient*. III. Título.

CDD 20º ed.: 550

**ODINEI DA SILVA MATOS JUNIOR**

# Modelagem e levantamento GPR em estruturas de concreto com antena de 400 MHz.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção de Bacharel em Geofísica.

Data de Aprovação: ___ / ___ / ___

Banca Examinadora

_____

Cícero Roberto Teixeira Régis – Orientador
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Pará

_____

José Gouvêa Luiz
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Pará

_____

Marcos Welby Correa Silva
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Pará

Aos meus pais, Nelma e Ney;
Às minhas irmãs Thais e Thamires.

## AGRADECIMENTOS

Foco minha mente, quando penso em agradecer, ao grande arquiteto do universo, onipotente, onipresente e onisciente. Que sempre me deu o que eu precisava, nem mais nem menos, me concebendo força em momentos de fraqueza e paz nos momentos de solidão.

À minha família que sempre acreditou em mim, mesmo quando o mundo dizia que eu não ia conseguir. Eles sempre estiveram a meu lado, como um pilar que sustenta o universo ou como o poderoso Atlas que sustenta o firmamento em suas costas.

À Universidade Federal do Pará, que através da faculdade de geofísica e do Instituto de Geociências, forneceu a infra-estrutura necessária ao meu desenvolvimento acadêmico.

Aos meus professores, que foram tão importantes para minha formação dedicando parte de seu tempo e esforço, alem de sua grande paciência. Agradeço em especial ao meu orientador Cícero Teixeira Reges, pois sem sua dedicação este trabalho não seria possível e pela bolsa de trabalho e por confiar em mim quando eu mesmo fraquejei. Ao professor João Henrique pela suas palavras de incentivo e a coordenadora do curso a professora Hellen Gomes com paciência e boa vontade para resolver meus problemas acadêmicos da melhor forma possível e ao professor Alberto Leandro que fortaleceu minhas bases cientificas.

Sem esquecer meus amigos de curso e os alunos da pós-graduação que me ajudaram a sair do aperto em horas de dificuldade. Principalmente os alunos Amilton,Clistonis,Danusa,Francisco e Alex que sem eles não teria chegado tão longe. Pelo companheirismo agradeço a Thiago Santa Rosa, Herbert e a Carla Paty, que me deram força e nunca duvidaram de minhas habilidades.

Agradeço também ao engenheiro Maico Gavinho Montoril, cujos dados serviram de base para o meu trabalho.

“Por falta de um prego, perdeu-se uma ferradura.
Por falta de uma ferradura, perdeu-se um cavalo.
Por falta de um cavalo, perdeu-se um cavaleiro.
Por falta de um cavaleiro, perdeu-se uma batalha.
E assim um reino foi perdido.
Tudo por falta de prego.”

**Livre adaptação de um poema de George Herbert (1651).**

## RESUMO

Este trabalho tem por finalidade utilizar o GPR com uma antena 400 MHz para descobrir até que ponto esta antena pode dar informações sobre um ambiente da engenharia civil, onde são usadas antenas com frequências maiores. O antena de 400 MHz foi comparada com outras antenas de frequências maiores, utilizando o software ReflexW 4.5, em modelos que simulam problemas comuns para a engenharia civil, como: fissuras, vazios no concreto, espessura de lajes e localização de barras de aço. Tornando possível a comparação entre os dados modelados com os dados de campo e possíveis limitações do software. No arquivo central da UFPA, foram feitas medidas com o GPR com antena de 400 MHz, para verificar que tipo de dados poderiam ser retirados com esta antena e que gral de resposta poderia ser obtido.

**Palavras – chave**: GPR. Antena. Reflexw. Software. Engenharia civil.

**ABSTRACT**

This study aims to gather knowledge on the responses of the computer modeling program Reflexw on a known environment and observe how best to use real resources to addressing problems related to civil engineering. The environment chosen are building structures and observation of wear using GPR (Ground Penetrating Solo). The work proposes the use of a 400 MHz antenna to observe the most common problems in a building construction, and compare with responses obtained with the GPR Reflexw software, to detect possible restrictions on withdrawals or the software itself.

**Key - words**:, GPR. Reflexw.  Antenna. Software. Building.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---|---|
| UFPA | Universidade Federal do Pará |
| FDTD | Finite Difference Time Domain |
| ASVHE | American Society of Heating and Vantilatng Engineers |
| GPR | Radar de Penetração no Solo |
| IG | Instituto de Geociências |
| CMP | Common Mid Point |
| EM | Eletromagnético |
| Eq. | Equação |

## LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|---|---|
| *I* | Corrente elétrica (mA) |
| Ω | Ohm |
| R | Resistência (Ω) |
| C | Capacitor (F) |
| ρ | Resistividade elétrica (Ω m) |
| $\rho_a$ | Resistividade elétrica aparente (Ω m) |
| σ | Condutividade elétrica (S/m) |
| $\sigma_a$ | Condutividade elétrica aparente (S/m) |
| v | Velocidade de propagação da onda eletromagnética (m/ns) |
| ω | Freqüência angular (2πf) |
| L | Indutância (H) |
| Z | Impedância elétrica |
| A | Área ($m^2$) |
| U | Volt (V) |
| Δt | Intervalo de amostragem temporal |
| Δx | Intervalo de amostragem espacial |
| $\nabla^2$ | Operador Laplaciano |
| $\nabla\vec{E}$ | Rotacional do campo elétrico |
| $\nabla\vec{H}$ | Rotacional do campo magnético |
| G | Condutância (S) |
| $\vec{j}$ | Densidade de corrente ($A/m^2$) |
| AGC | Automatic Gain Control |
| A/m² | Ampère por metro quadrado |
| C/m² | Coulomb por metro quadrado |
| F/m | Faraday por metro |
| GHz | Gigahertz ($10^9$ Hz) |
| H/m | Henry por metro |
| m | Metro |
| m² | Metro quadrado |

| | |
|---|---|
| $m^3$ | Metro cúbico |
| mA | Miliampère |
| MHz | Megahertz ($10^6$ Hz) |
| mS/m | Milisiemens por metro |
| ns | Nanosegundo ($10^{-9}$ segundos) |
| 1D | Uma dimensão |
| 2D | Duas dimensões |
| 3D | Três dimensões |
| α | Atenuação (dB/m) |
| β | Propagação (dB/m) |
| δV | Diferença de potencial (mV) |
| $\vec{B}$ | Indução magnética (W/m²) |
| $\vec{D}$ | Densidade de corrente de deslocamento (C/m²) |
| ε | Permissividade elétrica |
| $\vec{E}$ | Intensidade do campo elétrico (V/m) |
| f | Frequência (Hz) |
| $\vec{H}$ | Intensidade do campo magnético (A/m²) |
| λ | Comprimento de onda (m) |
| μ | Permeabilidade magnetica (H/m) |
| r(GPR) | Coeficiente de reflexão GPR |

## SUMÁRIO


**1 INTRODUÇÃO..... 13**

**2 METODOLOGIA..... 15**

**2.1** PROPRIEDADES ELÉTRICAS..... **15**

**2.1.1 Permissividade elétrica (ε)..... 16**

**2.1.2 Condutividade elétrica (σ)..... 16**

**2.1.3 Permissividade magnética (μ)..... 17**

**2.2** PROPRIEDADES ELETROMAGNÉTICAS DOS MATERIAIS..... **18**

**2.3** O MÉTODO GPR..... **20**

**2.3.1 Polarização de antena..... 20**

**3 MODELAGEM GPR..... 22**

**3.1** NUMÉRICA..... **22**

**3.2** BARRA DE AÇO..... **26**

**3.2.1 Espessura de camadas..... 32**

**3.2.2 Vazio em estrutura de concreto..... 34**

**3.2.3 Fissuras..... 37**

**3.2.4 Pavimento de concreto..... 40**

**4 PROCESSAMENTO DE DADOS GPR..... 43**

**4.1** PROCESSAMENTO: ACERVO CENTRAL..... **44**

**5 COCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES..... 51**

**REFERÊNCIAS..... 52**

# 1 INTRODUÇÃO

O método *Ground Penetrating Radar* (GPR) teve sua aplicação iniciada para modelos de subsuperficie após a descoberta da capacidade de penetração no gelo dos radares aéreos que originalmente serviam para detecção de navios e aviões durante a segunda guerra mundial.

Até o início da década de 70, os equipamentos GPR eram idealizados e montados pelos próprios usuários. Essa realidade mudou a partir de 1972 com a criação da *Geophysical Survey System Inc*. (GSSI) por Rex Morey e Art Drake, iniciando a produção do aparelho em série e comercializando-o (BORGES, 2002).

Uma das áreas de maior aplicação do GPR é a engenharia civil, onde o método pode dar informações sobre o terreno onde pretende-se construir uma edificação, no mapeamento de vigas metálicas ou tubulações de água ou gás. Também pode ser aplicado para monitoramento de estruturas de prédios ou outros tipos de construção como túneis e pontes.

A aplicação do GPR é diferente dos demais métodos elétricos de prospecção rasa por considerar o tempo de penetração da onda eletromagnética no subsolo. O GPR trabalha com ondas de alta frequência (10 a 2000 MHz) que são transmitidas para o solo, onde o sinal propagado sofre influência das propriedades elétricas presentes em profundidade. As heterogeneidades do meio fazem com que parte destas ondas sejam refletidas. Estas reflexões são detectadas por um receptor, que armazena a informação para futura análise.

Os parâmetros que influenciam nas medidas de GPR são: a permissividade relativa do meio, a condutividade, a permeabilidade magnética e a frequência da emissão. A frequência é o único parâmetro controlado pelo operador, geralmente dependendo do equipamento utilizado, os demais parâmetros são dependentes do meio observado.

Este trabalho tem por objetivo utilizar um modelo geofísico teórico para obter uma resposta equivalente à observada no campo e processar estes dados com o aplicativo REFLEXW (Sandmeier, 2001), para obter dados de uma estrutura predial

de concreto, tanto as que compõe o projeto original da construção, como as que não fazem parte do projeto, como áreas de vazio e rachaduras, classificando assim as melhores formas de resolução de dados de Radar com as funções apresentadas por este software.

Um dos objetivos deste trabalho é retirar o máximo de informação de uma antena de 400 MHz, a maior frequência para o equipamento GPR da faculdade de geofísica, da UFPA (Universidade Federal do Pará). Assim, delimitando que tipo de resposta pode ser obtido com este tipo de antena, para problemas da engenharia civil.

A organização deste trabalho será feita em seis partes, sendo: a primeira voltada ao estudo das propriedades elétricas de maior importância para o estudo GPR; a segunda traz uma breve observação sobre os tipos principais de locais de estudo principais deste trabalho e as causas das patologias prediais; a terceira volta-se para o estudo dos arranjos possíveis para a coleta de dados GPR; a quarta refere-se à modelagem numérica, e aos resultados da modelagem mediante o uso do software reflexw para os problemas mais comuns encontrados na construção civil; a quinta parte demonstra a aplicação desta teoria em dados reais, e a ultima parte faz uma análise sobre os resultados do trabalho e faz sugestões para a melhor aplicação da teoria aplicada neste trabalho.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 PROPRIEDADES ELÉTRICAS

Para o estudo do método GPR as propriedades eletromagnéticas devem ser levadas em consideração, sendo elas a: permissividade elétrica, condutividade elétrica e a permeabilidade magnética. Estas três propriedades são os dados referentes ao sinal do GPR inseridos no REFLEXW para representar o ambiente geológico em estudo. Neste trabalho apresentamos alguns valores destas propriedades utilizadas para a modelagem do tipo predial (Tabela 1).

Partindo das equações de Maxwell, que constituem a base da teoria eletromagnética, e supondo que os campos elétricos $\vec{E}$ e o magnético $\vec{H}$ variam harmonicamente com o tempo na forma $e^{i\omega t}$, e que $\partial/\partial t = iw$, sendo $\omega = 2\pi f$, obtém-se a seguinte equação da onda para o campo elétrico:

$$\nabla^2\vec{E} + K^2\vec{E} = 0 \qquad (1)$$

em que *K* é o número de onda, um termo que reúne as propriedades eletromagnéticas da rocha (condutividade elétrica *σ*, permissividade elétrica *ε*, e permeabilidade magnética *μ*), definido como:

$$K^2 = \omega^2 \mu\varepsilon - iW\mu\sigma. \qquad (2)$$

Em altas frequências, os dois termos de $k^2$ devem ser respeitados. Na mesma faixa de frequência é usual reescrever o número de onda *k* como: $k=\alpha+i\beta$, sendo α o termo ligado à atenuação da onda no meio e *β,* à constante de propagação, definidos originalmente em Stratton (1941).

#### 2.1.1 Permissividade elétrica (ε)

A permissividade elétrica é uma constante de proporcionalidade entre a intensidade do campo elétrico externo aplicado e o vetor deslocamento, :

$$\vec{D} = \varepsilon\vec{E} \qquad (3)$$

A permissividade absoluta (F/m) se define como o produto entre a permissividade relativa (ou constante dielétrica) do material , que é uma constante adimensional e a permissividade elétrica do vácuo ( = 8,854/10¹²):

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \tag{4}$$

A permissividade elétrica relativa é uma constante que da a medida da capacidade de polarização do material na presença de um campo elétrico. Para a maioria dos materiais que podemos encontrar no subsolo ao se realizar uma prospecção eletromagnética, os valores de permissividade elétrica relativa varia entre 1(ar) e 81(constante dielétrica da água a 20° C).

### 2.1.2 Condutividade elétrica (σ)

Na presença de um campo elétrico externo as cargas livres de um meio reagem fornecendo o que conhecemos por condutividade, sendo este o fator que relaciona o campo livre aplicado e a densidade de volume de corrente, devido à movimentação de cargas livres. Ou seja, proporciona a medida da capacidade do material de conduzir corrente elétrica. Segundo a lei de Ohm:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \tag{5}$$

onde $\vec{E}$ é o campo elétrico aplicado, $\vec{J}$ é a densidade volumétrica de corrente devido as correntes livres e σ é a condutividade do material expressa em Simens/metro (S/m).

Ao levar em consideração a condutividade podemos classificar os materiais em: condutores, semi-condutores ou isolantes. Os condutores são aqueles que apresentam valores na ordem superior a $10^5$ S/m, os isolantes apresentam valores inferiores à $10^{-8}$ S/m, sendo, portanto classificados como semicondutores os materiais que apresentam valores intermediários, maiores que os isolantes e menores que os condutores.

### 2.1.3 Permeabilidade magnética (μ)

Este parâmetro **μ** é o que relaciona a indução magnética **B** com a intensidade do campo magnético **H** (Henry por metro). Pode ser escrito como o produto da permeabilidade magnética do vácuo ($\mu_0 = 4\pi 10^{-7}\ \mathrm{H/m}$) e a permeabilidade relativa do material $\mu_r$:

$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu H \tag{6}$$

Na maior parte dos materiais a permeabilidade magnética relativa $\mu_r$ é aproximadamente 1 (exceto nos ferromagnéticos), não dependendo da frequência do campo magnético.

## **2.2** PROPRIEDADES ELETROMAGNÉTICAS DOS MATERIAIS

Segundo os valores apresentados na Tabela 1, para os mesmos materiais, tanto a permissividade elétrica relativa quanto a condutividade elétrica exercem influência sobre a velocidade de propagação da onda eletromagnética, equação 7, por exemplo, quando dois materiais apresentam valores iguais para a permissividade elétrica relativa e valores diferentes para a condutividade elétrica, a velocidade de propagação da onda será menor para o material com maior condutividade elétrica (REYNOLDS, 1997).

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}} \tag{7}$$

A antena recebe o pulso elétrico produzido pela unidade de controle, amplifica e transmite-o para o solo ou outro meio a uma frequência específica. A frequência da antena é um fator importante na profundidade de penetração. Quanto maior a frequência da antena, menor sua penetração, eq. 8. Uma antena de maior frequência, porém, possui resolução para alvos menores. A escolha da antena adequada é um dos fatores mais importantes no projeto de pesquisa

(MANJUNATH,2007). Tabela 2 mostra a profundidade de penetração media, a frequência da antena e a aplicação adequada.

$$f = \frac{2h}{\lambda t} \quad (8)$$

***f* =** frequência central da antena GPR.

**h** = profundidade do topo do alvo.

**t** = tempo duplo da propagação da onda eletromagnética.

TABELA 1 Relação entre as propriedades eletromagnéticas, velocidade(V) e constante de atenuação($\alpha$) para diversos materiais.

| **Material** | **Constante dielétrica $\varepsilon_r$** | **Permeabilidade magnética relativa $\mu_r$** | **Condutividade elétrica σ (S/m)** | **V(m/ns)** | **α(dB/m)** |
|---|---|---|---|---|---|
| Ar | 1 | $4\pi 10^{-7}$ (espaço livre) | 0 | 0,3 | 0 |
| Solo argiloso | 2,4 | 1 | 0,00027 | 0,19 | 0,28 |
| Argila | 5-40 | 1 | 0,002 - 1 | 0,13- 0,047 | 1-300 |
| Água fresca | 81 | 1 | 0,0005 | 0,033 | 0,1 |
| Água do mar | 81 | 1 | 3 | 0,033 | $10^3$ |
| Areia seca | 3-5 | 1 | 0,00001 | 0,173-0,134 | 0,14 |
| Areia saturada | 20-30 | 1 | 0,0001- 0,001 | 0,06 - 0,05 | 2,25 |
| Concreto seco | 4-10 | 1 | 0,001- 0,0001 | 0,15 - 0,094 | 0,5-2,5 |
| Concreto saturado | 10-30 | 1 | 0 | 0,094-0,054 | 0,5-2,5 |
| Aço | 1 | 100 | $10^7$ | 0,03 | $9{,}5.10^8$ |

**Fonte: adaptado de Daniels (1996), Zeng e Mcmechan (1987), Annan (1992), Porsani (1999), Prado (2000).**

A resolução, ou seja, a capacidade de discriminar sinais provenientes de refletores próximos é diretamente proporcional à frequência (e inversamente proporcional ao comprimento de onda, $\lambda$=v/f).

Altas condutividades e altas frequências contribuem para uma maior absorção da energia da onda através do meio, resultando em uma menor penetração desta, porém maior resolução (MELO, 2007).

A profundidade de penetração depende diretamente de uma serie de fatores, dentre eles: o espalhamento geométrico, a atenuação pelo terreno, fatores estes ligados à perda de energia durante a propagação da onda EM.

A profundidade de penetração é uma estimativa teórica da profundidade máxima de investigação possível considerando a frequência da onda EM e o material, considerando sua dispersão (BORGES, 2002).

Na Tabela 2 são apresentadas profundidades de penetração normalmente encontradas em alguns materiais, calculadas para valores médios de condutividade desses materiais.

TABELA 2 Áreas de aplicação do GPR, frequência central recomendada das antenas para a aplicação e estimativa da profundidade de penetração correspondente

| ÁREA DE APLICAÇÃO | FREQUÊNCIA CENTRAL (MHz) | PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO (m) |
|---|---|---|
| **Antenas com ligação à terra (Ground-Coupled Antennas)** | | |
| Avaliação do concreto | 1600 | 0,5 |
| Engenharia-Inspeção em concreto | 1500 | 1 |
| Engenharia-Identificação de vazios em concreto | 900 | 2 |
| **Antenas de transmissão pelo ar (AIr-Launched Antennas)** | | |
| Engenharia-Inspeção de Pavimentação de estradas | 2000 | Até 0,75 |
| Engenharia-Inspeção de Pavimentação de estradas | 1000 | 1 |

Fonte: adaptada de GSSI (2006)**.**

## 2.3 O MÉTODO GPR

### 2.3.1 Polarização de antena

Um dos fatores mais importantes para a aquisição de dados de GPR é a relação entre a disposição de antenas, transmissora e receptora, e o alvo de pesquisa.

A polarização é a grandeza vetorial que descreve a magnitude e direção do campo magnético, e elétrico, de uma onda eletromagnética que se propaga no espaço e no tempo. Quando a onda é formada por campos com variação harmônica, tornam-se possíveis três tipos de polarização: linear, elíptica e circular. Sendo que a linear e a circular podem ser consideradas como casos particulares da polarização elíptica (ZEBKER, et al,1987).

Nossa limitação em criar um modelo ideal de arranjo de antenas para estudar determinado local é óbvia. Não conhecemos o ambiente em subsuperficie, logo não podemos colocar um arranjo ideal para ele. Porém, podemos utilizar vários arranjos para conseguir encontrar o que melhor se adequa ao ambiente alvo.

No mercado atualmente existem diversos tipo de antenas, sendo um dos modelos mais comum o conjunto de antenas transmissora e receptora, do tipo dipolar de polarização linear (que pode ser blindada). A Figura 1 apresenta os tipos mais comuns de arranjos para antenas levando em consideração os eixos x-y (LIMA, 2006).

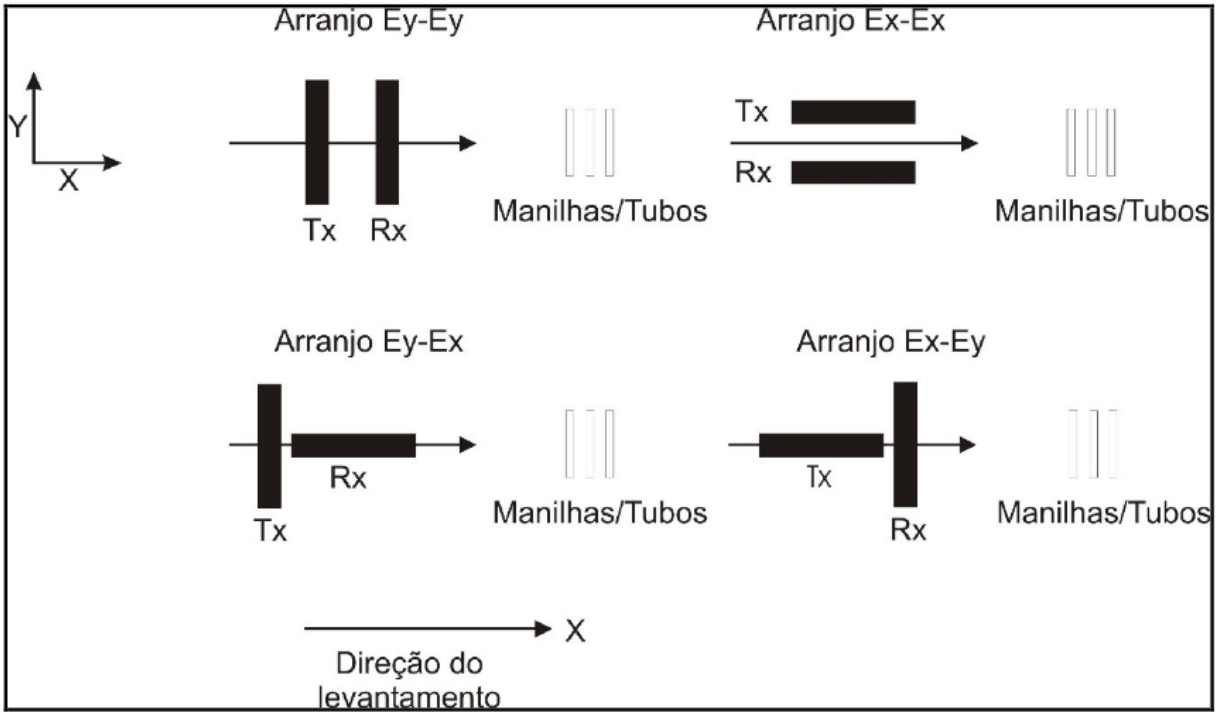



**Figura 1** – Arranjo de antenas utilizado nas aquisições de campo
Fonte: Lima (2006)

Os arranjos principais são os de antenas paralelas Ex-Ex e Ey-Ey, por apresentar em uma melhor relação de polarização de antenas transmissora e receptora (ANNAN, 1992).

# 3 MODELAGEM GPR

## 3.1 NUMÉRICA

Para ser bem sucedido no processo de modelagem numérica de dados GPR é necessário conhecer bem o software utilizado e suas limitações. Alguns trabalhos anteriores já mostraram a utilização do REFLEXW para tratar dados deste tipo com sucesso utilizando como base o método de diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD – Finite Difference Time Domain), que tem por finalidade calcular as equações de Maxwell para obter respostas sobre propagação, transmissão e espalhamento das ondas eletromagnéticas em um meio qualquer, que na maioria das vezes depende das condições de contorno (WEXLER, 1969).

O Método consiste na aplicação de procedimentos matemáticos computacionais para obter a solução de um problema de caráter científico através de aproximações numéricas sucessivas. Para tanto, o método FDTD busca substituir as equações diferenciais por diferenças finitas obtidas por meio da expansão em Série de Taylor e truncamento ao nível da ordem de erro desejada. As equações de Maxwell são resolvidas via equações algébricas, considerando o conceito de discretização desenvolvido por Euler, na qual as taxas relacionadas às derivadas são substituídas por incrementos espaciais (Δx) e temporais (Δt) (COSTA, 2002).

Os valores de variação de Δx e a frequência são escolhidas pelo operador, de acordo com o alvo de estudos e o nível de precisão desejado, a sugestões para o valor de Δx de acordo com a frequência escolhida, porém deve-se levar em consideração um modelo com propriedades o mais próximo do real, onde um Δx muito pequeno seria difícil de ser reproduzido.

Os valores de Δt são calculados automaticamente pelo software, respeitando o critério de estabilidade numérica e proporcionando condições de convergência ao sistema (TAFLOVE; BRODWIN, 1975; SANDMEIER, 2003). O valor máximo para o incremento temporal (Δt) depende da velocidade máxima do meio ($V_{MAX}$) e do incremento espacial (Δx), dado aproximadamente por:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{\sqrt{v_{max} N}} \quad (9)$$

O valor de N depende do tipo de modelo aplicado, geralmente igual a 2, que corresponde a sua dimensão espacial utilizada para um tempo duplo de trânsito (SANTOS, 2006).

O tamanho do incremento espacial está relacionado ao comprimento de onda mínimo, isto é, depende da escolha dos parâmetros físicos e da frequência central da antena. Todavia, vale lembrar que a simulação numérica é baseada na solução das Equações de Maxwell em meios homogêneos e sem dispersão, então assume-se que os parâmetros físicos são independentes da frequência e que são constantes na direção **z**. Dependendo da escolha do incremento espacial e temporal pode ocorrer uma dispersão numérica (não física), pois ela pode influenciar a velocidade de propagação numérica da onda EM em uma malha de diferenças finitas, gerando o erro numérico. A dispersão numérica está diretamente relacionada à densidade de amostragem (BELÉM, 2001; SANDMEIER, 2003).

A escolha das *condições de contorno absorventes* é importante para a simulação numérica da propagação de ondas eletromagnéticas, visto que em situações reais, a área de interesse é infinita em algumas direções, e em contrapartida no domínio computacional a memória é finita. Assim, as condições de contorno absorventes lineares (*linear absorbing range*), foram utilizadas visando limitar no espaço a região infinita, proporcionando uma diminuição de reflexões espúrias dos contornos do modelo, através do aumento gradativo da condutividade, alcançando um valor máximo nas extremidades (SANDMEIER, op cit.). O valor máximo da condutividade é definido pela expressão (10).

$$\sigma_{end} = fac\ \omega\ \varepsilon_{act}\ \varepsilon_0 \quad (10)$$

$\boldsymbol{\sigma_{end}}$ é a condutividade final com relação ao $\boldsymbol{\varepsilon_{act}}$;

**ω** é a frequência angular;

$\boldsymbol{\varepsilon_{act}}$ é o valor atual de **ε** do último ponto do modelo antes do limite;

$\boldsymbol{\varepsilon_0}$ é a permissividade elétrica do vácuo;

**fac=**$\frac{Size}{50}$, onde Size é o número de pontos do grid.

O ReflexW nos dá três opções para gerar o campo de ondas: *Plane wave, point source* e o modelo *exploding reflector* (refletor explosivo), (SANDMEIER, 2001).

Considerando o enfoque da pesquisa e visando simular um perfil GPR *zero-offset,* o campo de ondas foi gerado aplicando-se o conceito *exploding reflector*, no qual as ondas são geradas simultaneamente a partir do refletor e enviadas para a superfície (YILMAZ, 1987). Por outro lado, sabe-se que nesse procedimento a onda eletromagnética tem apenas o tempo de ida e que, na realidade, no procedimento usado na aquisição com o GPR a onda refletida é registrada em função do tempo duplo (tempo de percurso de ida e volta). Para que o tempo de ida simule um valor equivalente ao tempo duplo, a velocidade do meio é dividida por dois (v/2) na modelagem numérica (SANDMEIER, op cit.).

Uma vantagem de se utilizar esse tipo de fonte é que a parte cinemática das reflexões primárias é corrigida, colapsando a energia da onda difratada para o ápice da hipérbole, sendo um procedimento comum na etapa de migração dos dados sísmicos e de GPR (YILMAZ, op cit.). Uma outra vantagem é que o uso de uma fonte do tipo *refletor explosivo* não gera efeito de borda no modelo simulado.

Outro fator importante, a ser considerado, na criação de um modelo são as propriedades do meio, materiais muito condutivos, como as argilas, podem facilmente impedir a penetração das ondas eletromagnéticas. Para o método GPR alcançar o êxito desejado o solo deve permitir a transmissão de ondas eletromagnéticas. Considera-se, na pratica, que o método produz respostas satisfatórias em ambientes geológicos com resistividade maior ou igual a 500 Ωm, condutividade menor ou igual a $2X10^{-3}$ S/m (LUIZ,1998).

Os processos principais de tratamento dos dados GPR são: Armazenamento dos dados, processamento e geração da imagem final. Neste tipo de trabalho, ter em mente esta sequência de etapas leva a uma melhor organização dos processos até chegar ao objetivo final. Começando pela aquisição dos dados de campo, a delimitação da área de estudo e as posições de medidas são de importância vital para o tratamento dos dados posteriormente, sem um cuidado adequado nesta etapa, podemos ser induzidos a erros na interpretação dos dados.

No software Reflexw, os dados são trabalhados assim que se inicia um novo projeto (*confirm project*), que imediatamente gera, em um diretório criado anteriormente, seis pastas: ASCII, LINEDATA, MODEL, PROCDATA, ROHDATA e TRAVTIME. Sendo a pasta ASCII voltada para armazenamento dos dados de campo brutos, e as demais para uso posterior de acordo com o processamento aplicado.

O processamento dos dados é feito em etapas não necessariamente em determinada ordem ou mesmo aplicadas sempre, são elas: edição, processamento básico, processamento avançado e visualização da imagem processada. Sendo este ultimo aplicável em qualquer momento do processo, ou mesmo aplicável varias vezes.

O Processamento básico consiste primeiramente no melhoramento do sinal para melhor estudá-lo. Devemos encontrar o tempo zero do sinal, pois qualquer sinal anterior ao solo é considerado ruído e deve ser removido, isso pode ser feito mediante observação do sinal e remoção do sinal feito pelo próprio operador com a função *STATIC CORRECTION* e *Move Startime*.

Outro passo importante é a filtragem para remover a banda de ruído do sinal, a escolha do filtro mais adequado depende do alvo de pesquisa e das condições do ambiente, dentre os mais utilizados encontramos os seguintes: *Dewow* e Passa Banda. Sendo o filtro *Dewow* aplicado para remover o ruído devido ao *Background*, gerado pelo ambiente e os instrumentos. Para o caso de ruído incoerente, aplicação do filtro passa banda é o mais adequado, o comando Mean Filter aplica esse filtro com outros tipos de aplicação, como *Bandpassfrequency* ou *Bandpass Buttherworth*.

Após a filtragem do sinal somente parte do sinal restará, essa é a parte de interesse do trabalho, mas nesta etapa ainda teremos pontos de maior interesse e

será difícil identificá-los devido à baixa resolução do dado, aqui aplicamos os filtros de ganho. Esse tipo especial de filtro tem por finalidade intensificar parte do sinal para facilitar sua visualização.

A aplicação de ganho é feita com o comando GAIN, no caso de um ganho para recuperar o sinal absorvido ou dissipado pelo meio um dos tipos de ganho a ser aplicado é o *AGC GAIN*, para o ganho linear ou exponencial aplicamos o *GAIN FUNCTION.*

Se necessário, podemos visualizar a resposta dos dados para cada etapa para melhor escolher os filtros a serem aplicados e a melhor resposta para o problema proposto. Se necessário esta etapa deve ser repetida mais de uma vez, até conseguir uma resposta coerente ao esperado com relação a informações a priore e de outros métodos geofísicos aplicados.

## 3.2 Barra de aço

Para analisar uma barra de aço e sua resposta no software, a idéia da modelagem deve estar bem clara na mente do operador, então com a Figura 2, as dimensões do modelo são especificadas, com uma barra de aço de 5/8”(0,01m de diâmetro), a uma profundidade de 0,05m da superfície para seu centro, localizada no ponto zero do eixo horizontal (x), suas propriedades eletromagnéticas são as descritas para o aço na Tabela 1.

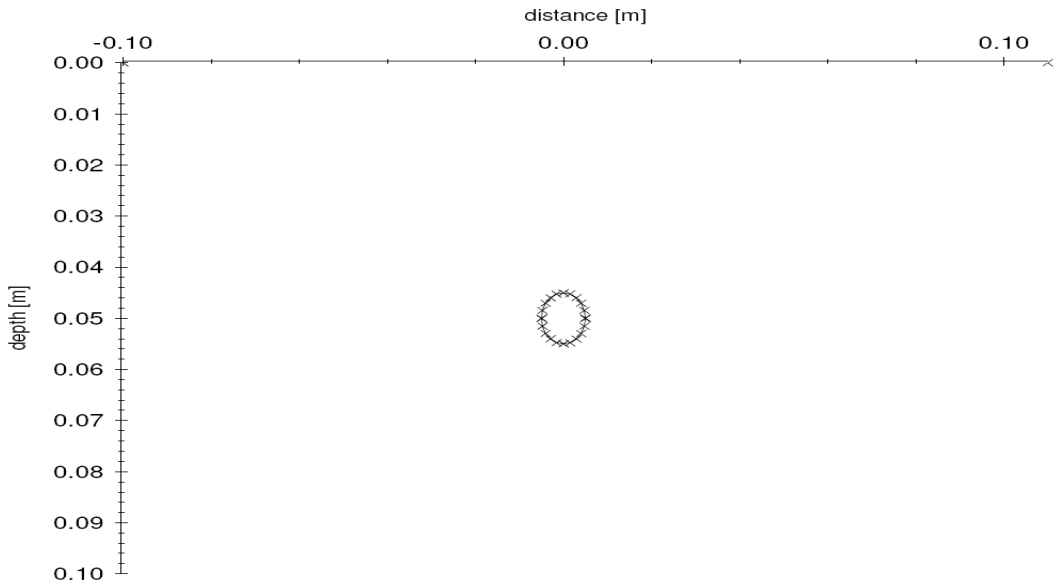



**Figura 2-** figura ilustrativa do modelo com uma barra de aço em uma placa de concreto, a barra posiciona-se exatamente com seu centro no ponto zero do eixo x, e a 0,05m do eixo y.

Considera-se que as dimensões do concreto, tanto na sua extensão quanto em sua profundidade são tão grandes que não interferem, com suas bordas, na anomalia gerada pela barra de aço.

Após o uso do software Reflexw neste modelo obtém-se um sinal forte referente à barra, o que já era esperado já que as propriedades eletromagnéticas do aço são elevadas e o meio do modelo é resistivo gerando um contraste entre as propriedades que pode ser notado na Figura 3, para uma frequência de 400 MHz.

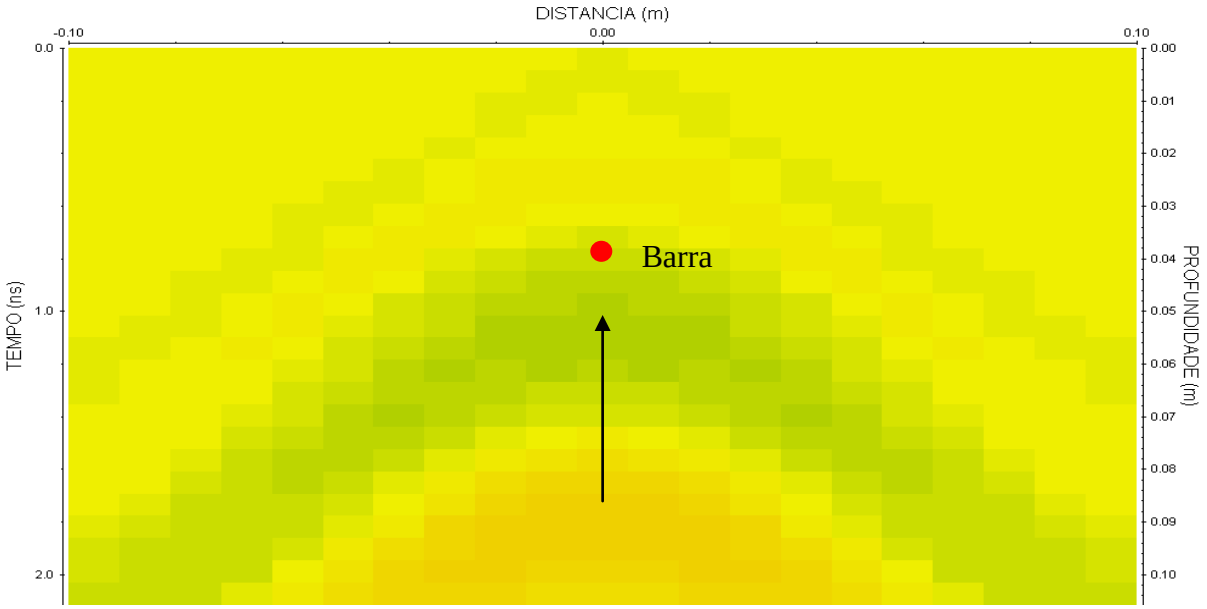



**Figura 3 -** Anomalia gerada pela barra de aço, em uma frequência de 400 MHz.

Se o objetivo for uma resposta mais precisa, para uma menor profundidade de investigação a Tabela 2 sugere frequências maiores que 900 MHz, como a barra do modelo está a menos de 0,1m e a profundidade máxima de investigação desejada para este caso é de 1m, então uma segunda frequência escolhida é de 1GHz, que pode ser visualizada na Figura 4.

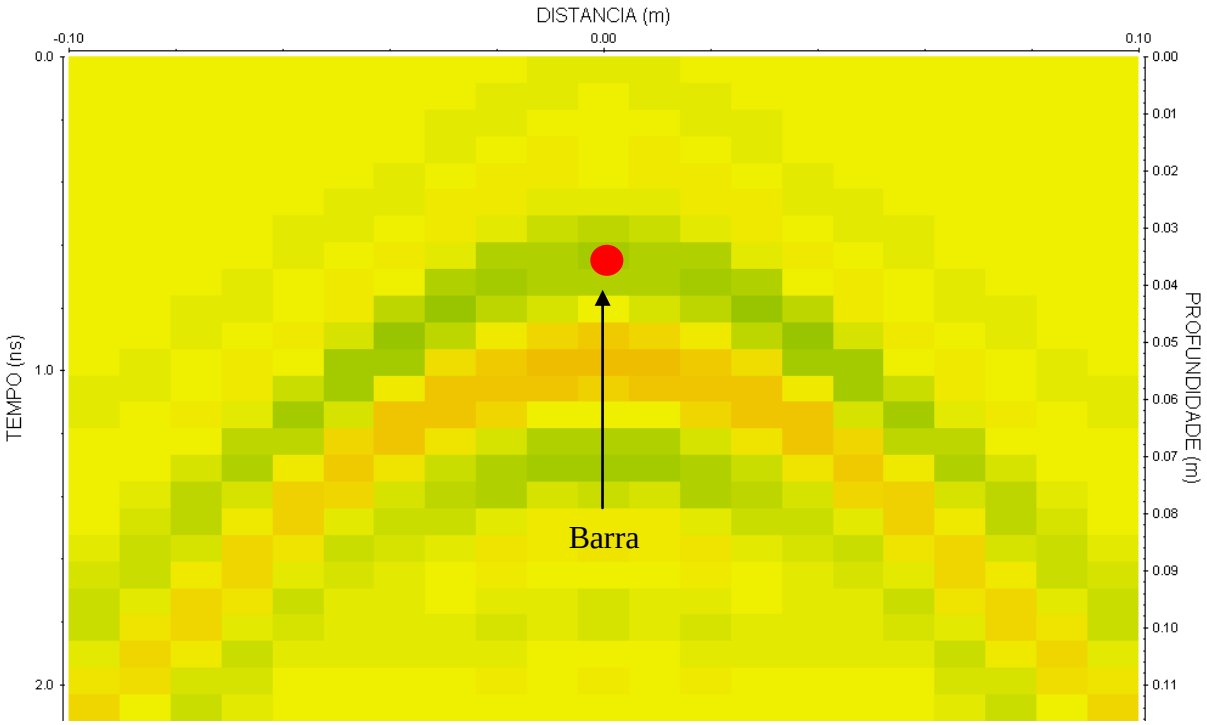



**Figura 4 -** Anomalia gerada pala barra para uma frequência de 1 GHz.

O topo da hipérbole coincide com o topo da barra de aço, porém esta é a única informação que obtém-se da barra, pois a abertura do sinal não nos dá as verdadeiras dimensões da barra, só indicam sua presença e sua profundidade teórica.

O sinal da barra não apresenta uma boa resolução para uma antena de baixa frequência, e presume-se que quanto maior a frequência melhor será a resolução. Para este caso a Tabela 2 sugere a frequência máxima de 1,6 GHz para uma investigação de até 0,5m. Mais que suficiente para uma investigação de concreto, Porém, deve-se observar que se o objetivo for apenas localizar a barra de aço, este objetivo será cumprido pela antena de 400 MHZ.

A barra da Figura 2 apresenta um sinal tão forte que dificulta a observação de qualquer sinal abaixo dela. Esse efeito pode ser visto, se considerarmos o modelo da Figura 5, onde são apresentadas três barras, uma com variação vertical e outra horizontal, a barra 2, disposta abaixo da barra 1, não pode ser percebida já a barra 3 pode ser identificada com facilidade, de acordo com a figura 7.

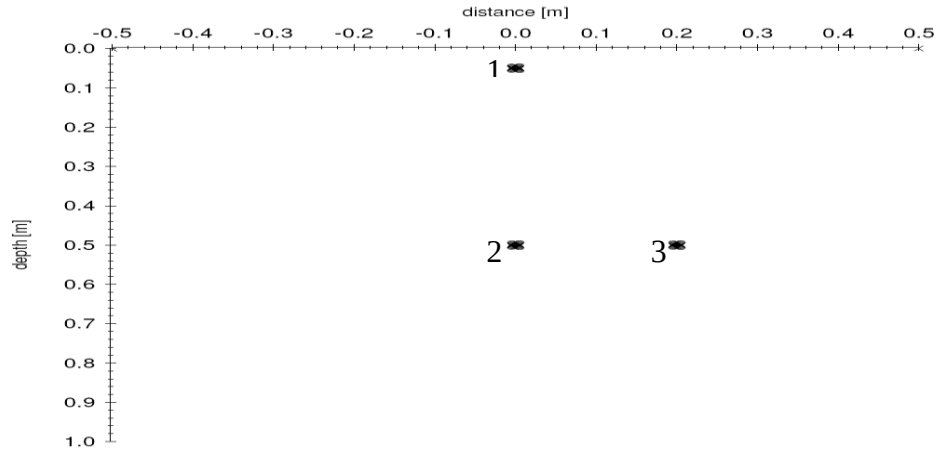



**Figura 5** – Modelo apresentando três barras de mesmas propriedades em posições diferentes em uma ambiente de concreto com dimensões suficientemente grandes para não afetar, com suas bordas, a resposta referente as barras de aço.

A resposta para as duas barras da Figura 5 localizadas na posição x igual a zero está representada na Figura 6. Observa-se que a resposta foi nula para a barra a 0,5m de profundidade devido ao sinal da barra mais rasa ser muito forte, blindando completamente o sinal da barra mais profunda. Com isso pode ser concluído que o GPR não pode identificar barras sobrepostas. Obviamente, se as

barras estiverem afastadas de uma distância, em profundidade, grande o suficiente para que o sinal da primeira barra não interfira no da segunda barra, teremos a resposta das duas, porém esta distância teria de ser maior que 0,5m o que torna a esta proposta inviável para o estudo de concreto onde lidamos com paredes e lajes de espessuras, geralmente, inferiores a esta distância.

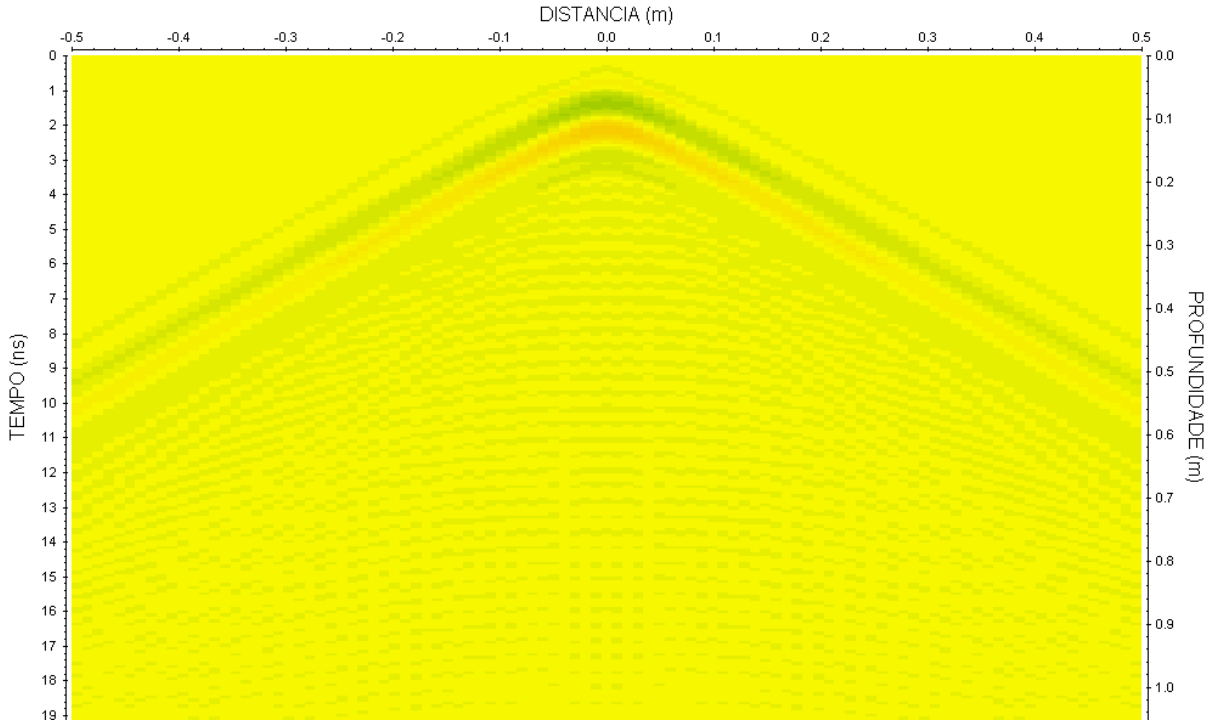



**Figura 6 –** Modelo apresentando barras sobrepostas.

Para o caso de considerarmos as três barras da figura 5, o fenômeno observado é diferente, (Figura 7). Lateralmente, parte do sinal é somado e a outra parte destaca-se indicando o topo da anomalia devido à terceira barra. Mas não se deve esquecer que o topo da anomalia para a terceira barra está sofrendo influência da barra um, e provavelmente da barra dois também, por isso, seu estudo deve ser desenvolvido com cautela.

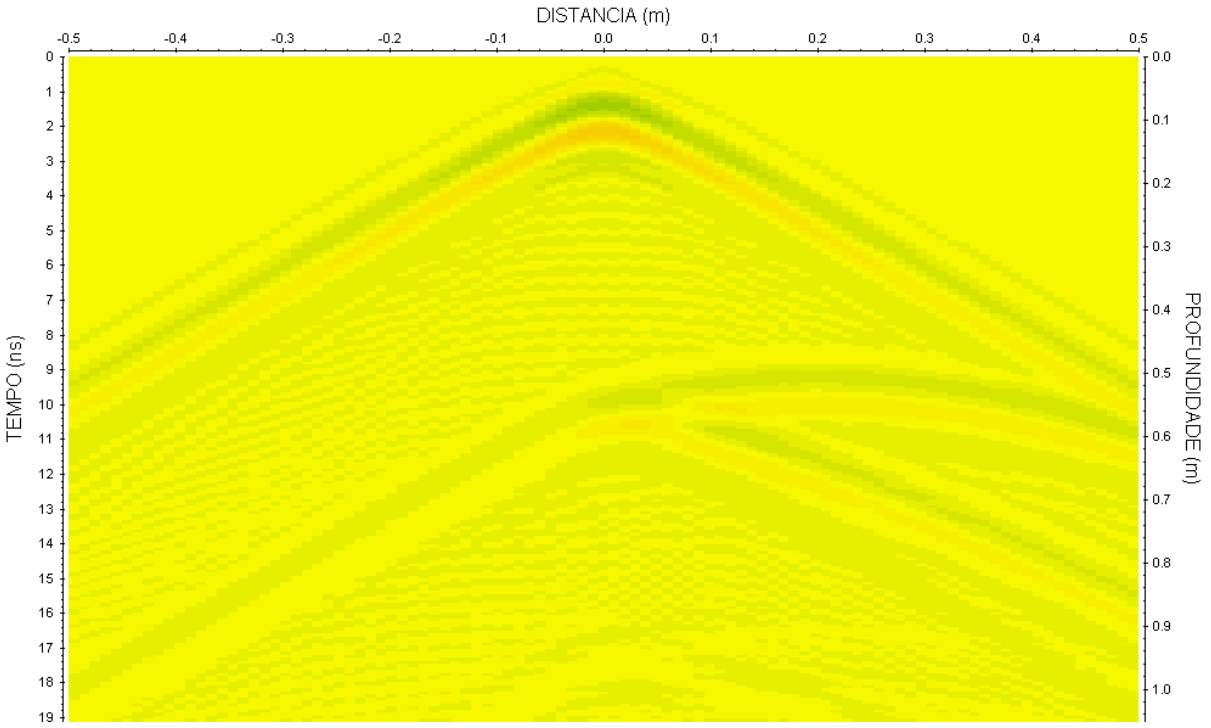



**Figura 7 –** Resposta GPR para o modelo da Figura 5.

Também podemos constatar que para barras paralelas a resposta será adequada e sua identificação será fácil. O problema esperado está no cruzamento dos sinais das hipérboles que podem mascarar dados abaixo das barras, o que pode ser observado na Figura 9 que corresponde aos resultados do modelo mostrado na figura 8. As barras estão espaçadas de 0,1m uma da outra, uniformemente a 0,05m de profundidade.

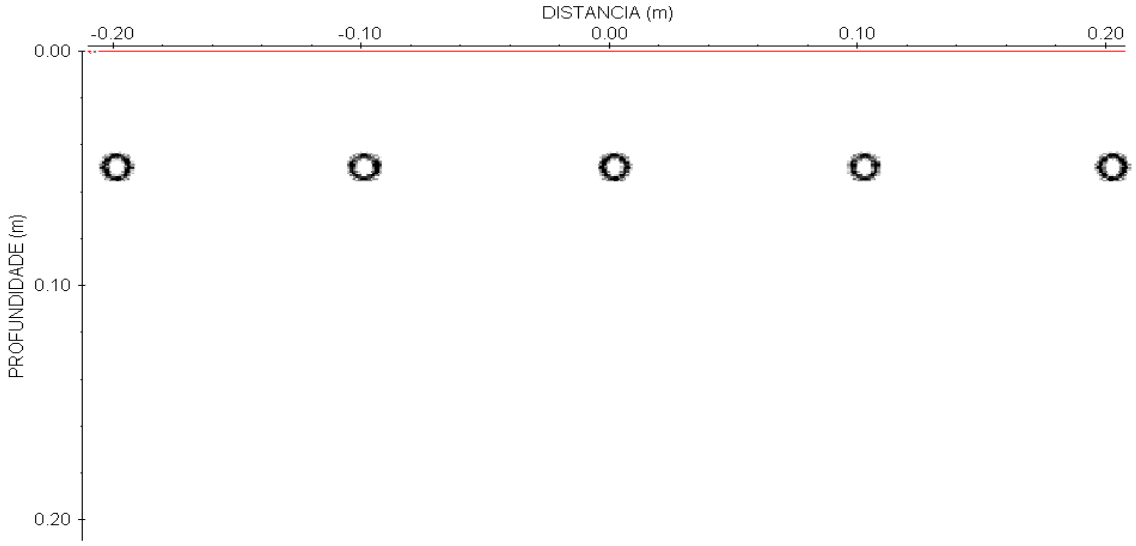



**Figura 8** – Modelo de barras espaçadas horizontalmente de 0,1m .

A resposta para este modelo com uma frequência de 400 MHZ pode ser visualizada na Figura 9, onde o topo das hipérboles corresponde aproximadamente a posição das barras, 0,05m, a partir do topo da anomalia como dito anteriormente.

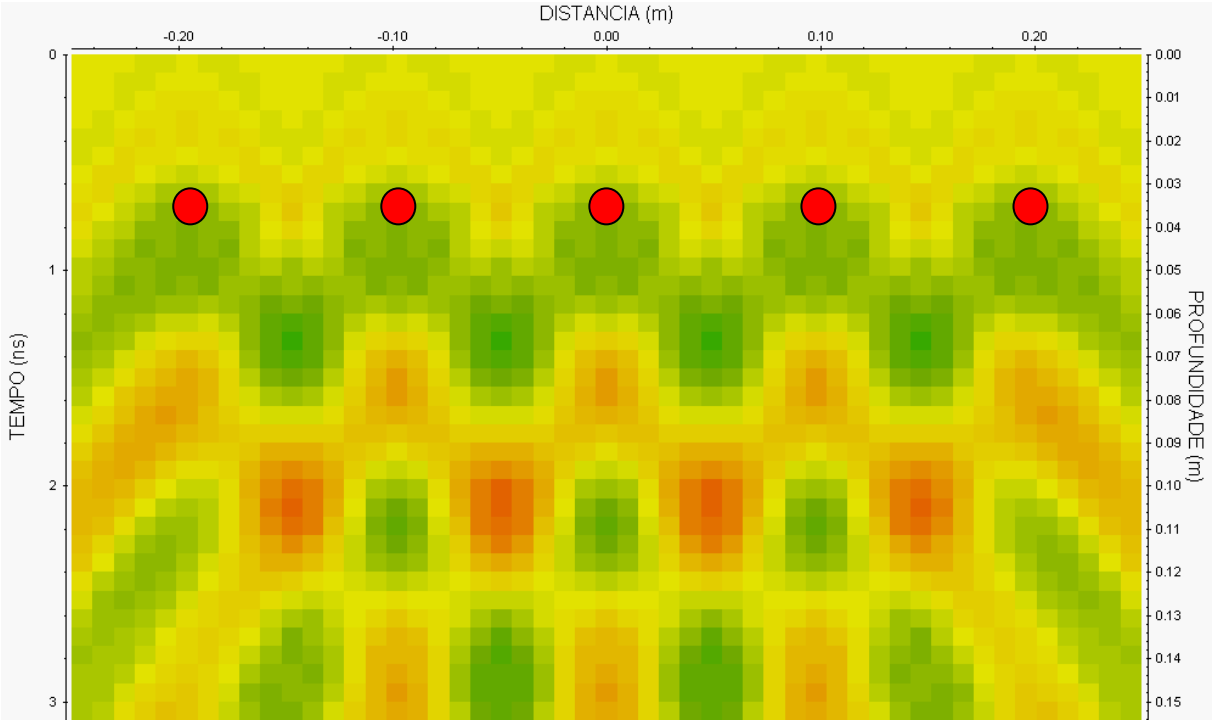



**Figura 9 –** Resposta GPR para o modelo com barras paralelas.

### 3.2.1 Espessura de camadas

Para um modelo simples de quatro camadas, sendo a primeira de concreto seco, um espaço vazio até outra camada de concreto e por fim um embasamento argiloso com permissividade elétrica de 30 F/m. A finalidade é identificar a espessura de cada camada com o uso do Reflexw. A Figura 10 representa este modelo de camadas. Este tipo de aplicação permite estimar espessuras de paredes e pisos, encontrar salas e túneis ocultos.

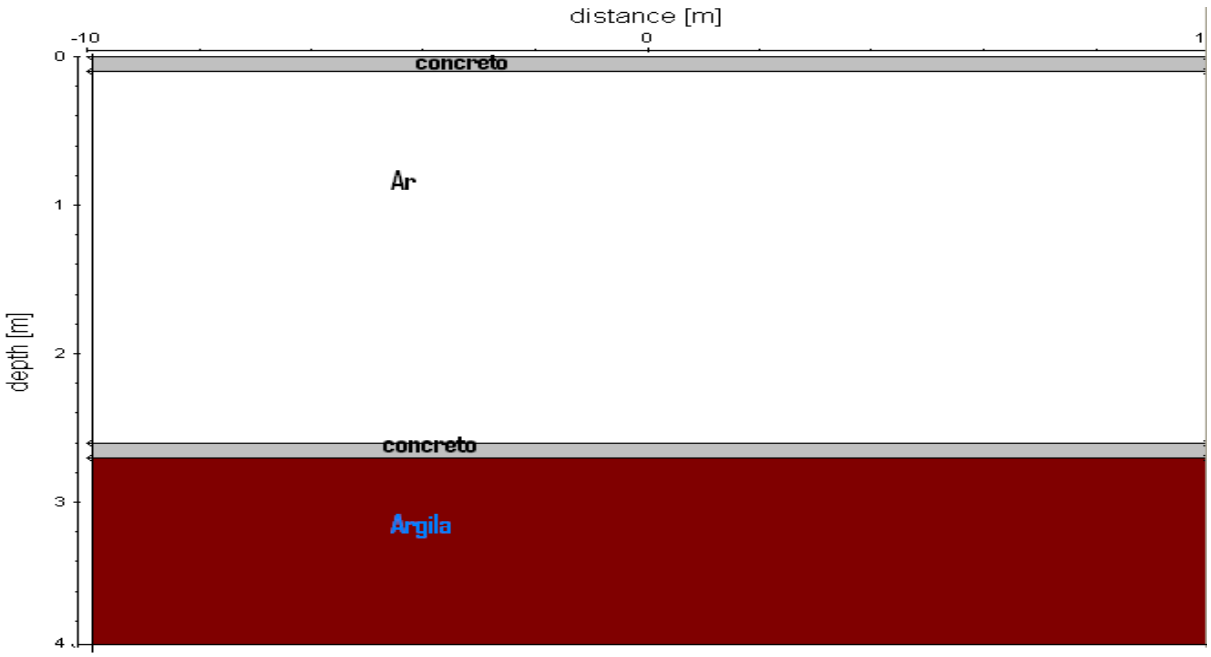



**Figura 10 –** Modelo de quatro camadas, com as seguintes interfaces, respectivamente: concreto, ar, concreto, argila.

As dimensões mínimas para lajes maciças são especificadas pelas normas da NBR 6118/2003, estas normas estão dispostas na tabela 3, para rápida consulta.

TABELA 3 Espessura mínima de lajes de concreto segundo normas da NBR 6118/2003

| Lajes | Espessura mínima em cm | Carga máxima suportada |
|---|---|---|
| Cobertura | 5 | Nenhuma |
| Piso | 7 | Nenhuma |
| Piso que suporte veiculo | 10 | ≤ 3000 Kg |
| Piso que suporte veiculo | 12 | ≥ 3000 Kg |

Fonte: Botelho (2007)

Para este modelo de camadas, a onda não encontra dificuldades para penetrar no espaço vazio, então se faz necessária a mudança da velocidade para compensar esta camada de alta velocidade. Então deve ser escolhida uma velocidade entre 0,1 m/ns “velocidade do concreto”, e 0,3 m/ns “velocidade no ar”. A Figura 11 apresenta a resposta do Reflexw para o modelo da Figura 10 com as referidas camadas bem delineadas, o objetivo de identificar a espessura das camadas de concreto foi alcançado com êxito. Porém, não se pode afirmar muito referente a camada de argila, onde a penetração da onda eletromagnética é mínima, a partir dela podemos ser induzidos a acreditar que existem varias interfaces,

quando na verdade o mais provável é que este seja um efeito gerado pela reverberação entre a camada de concreto e a de argila.

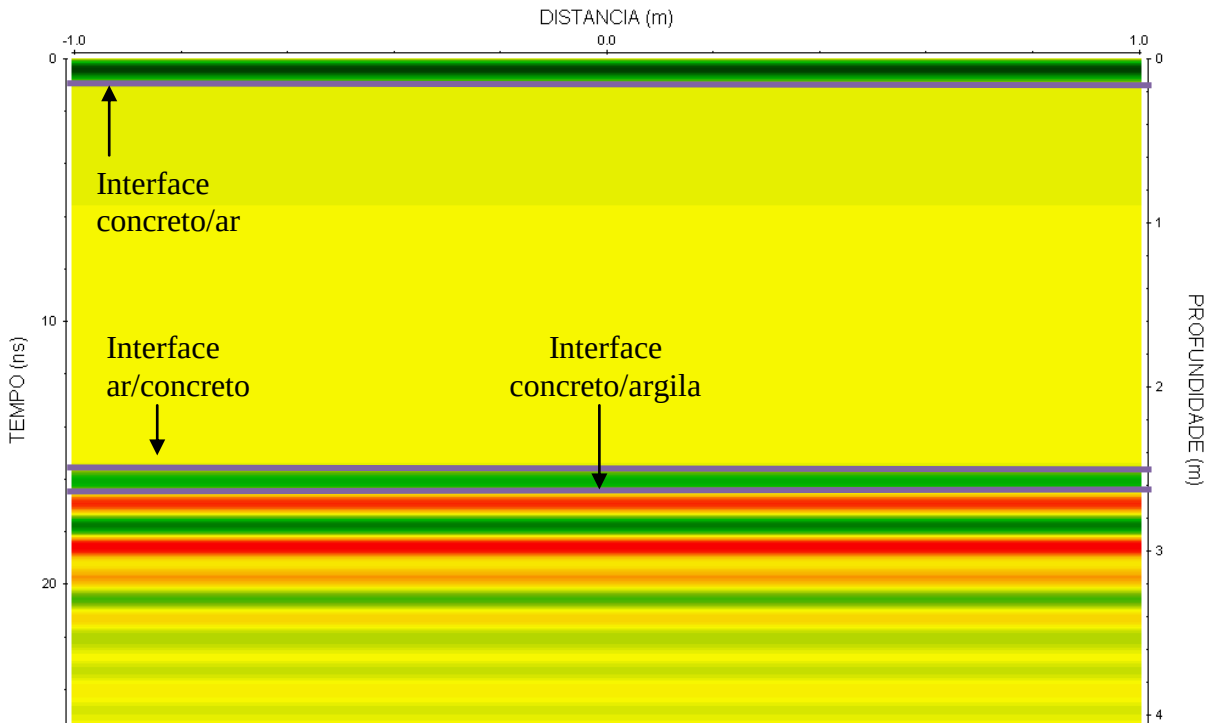



**Figura 11 –** Resposta GPR para o modelo da Figura 10, para uma frequência de 400 MHz.

### 3.2.2 Vazio em estrutura de concreto

Uma zona de vazio é uma parte do corpo de concreto, ou outro material, que apresenta uma alta porosidade, devido desgaste, formação de bolhas de ar durante a preparação do concreto ou reações químicas no interior do material. Uma deteriorização deste tipo pode prejudicar toda a estrutura.

A maneira mais simples de compreender um vazio na estrutura é imaginá-lo como uma caixa de ar no interior de uma estrutura sólida, que pode ter dimensões pequenas, para o começo do problema até atingir metros em estradas ou pisos.

Um exemplo deste tipo de problema é o de uma caixa de ar, a 0,05m da superfície, com 0,1m de profundidade e 0,2m de largura, como pode ser visto na Figura 12.

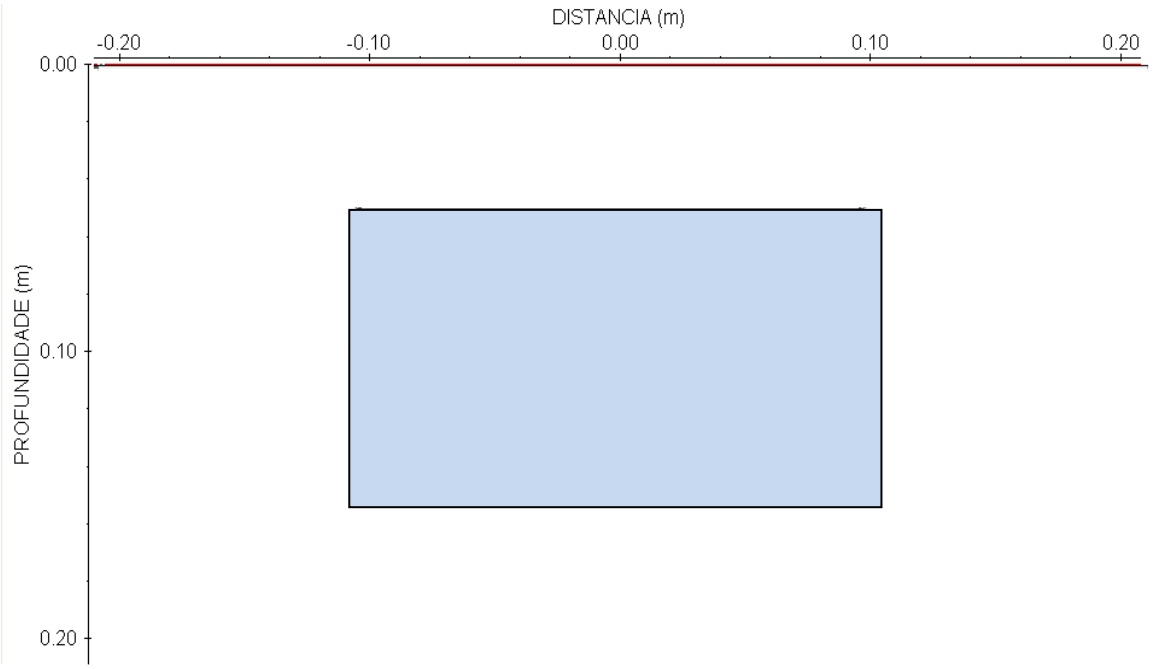



**Figura 12 –** Modelo de vazio em um bloco de concreto.

Suas bordas podem ser identificadas por hipérboles que permitem que suas dimensões sejam estimadas. Na Figura 13 é apresentada a resposta do GPR para o modelo apresentado na Figura 12, com duas hipérboles quase sobrepostas indicando o começo e o final do vazio e um sinal ligando o topo destas hipérboles referente ao topo da referida fonte anômala. Entre os dois sinais devido às bordas da anomalia da estrutura encontra-se um sinal característico indicando uma diminuição do sinal do radar devido a esse vazio na armadura de concreto. O sinal gerado nas interfaces entre o concreto e o ar é forte. Na posição correspondente ao vazio na estrutura há um sinal mais fraco e a presença de uma hipérbole de alto sinal bem abaixo do sinal anômalo indicando outra interface.

Com estes dados é possível afirmar que o GPR tem a capacidade de estimar com precisão um vazio em um ambiente de concreto, estimando sua largura.

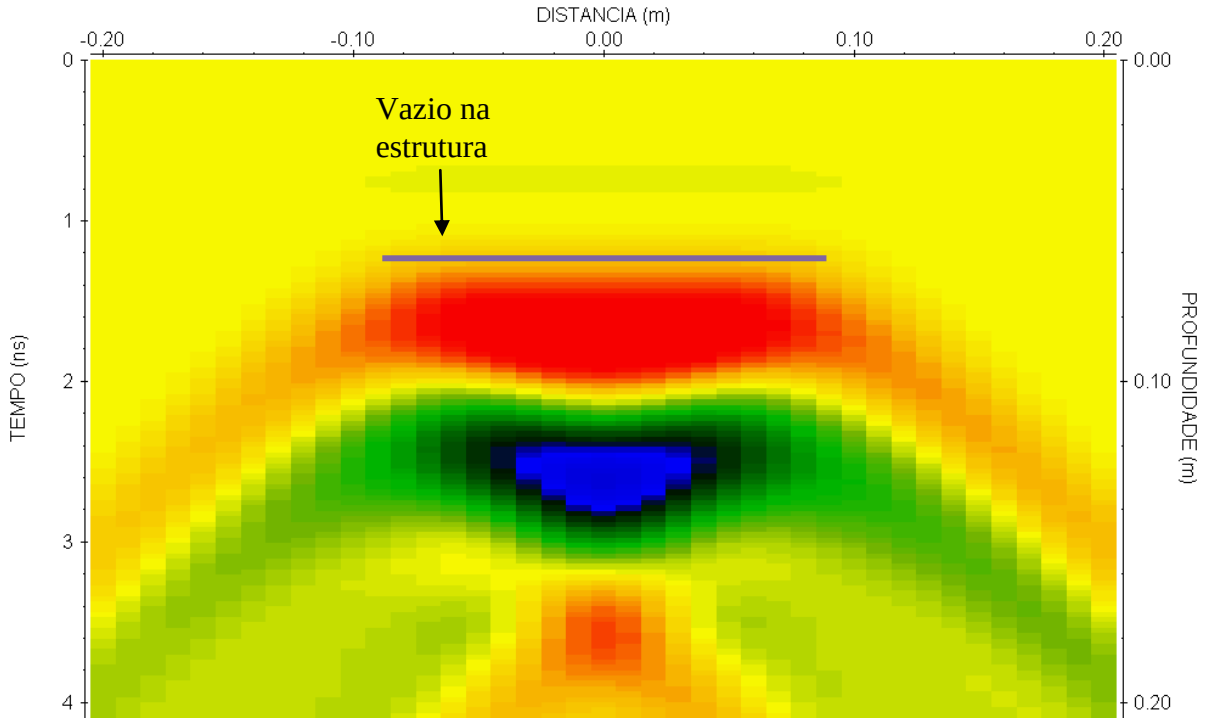



**Figura 13 –** Resposta GPR para o modelo apresentado na figura 12, para uma frequência de 400 MHz.

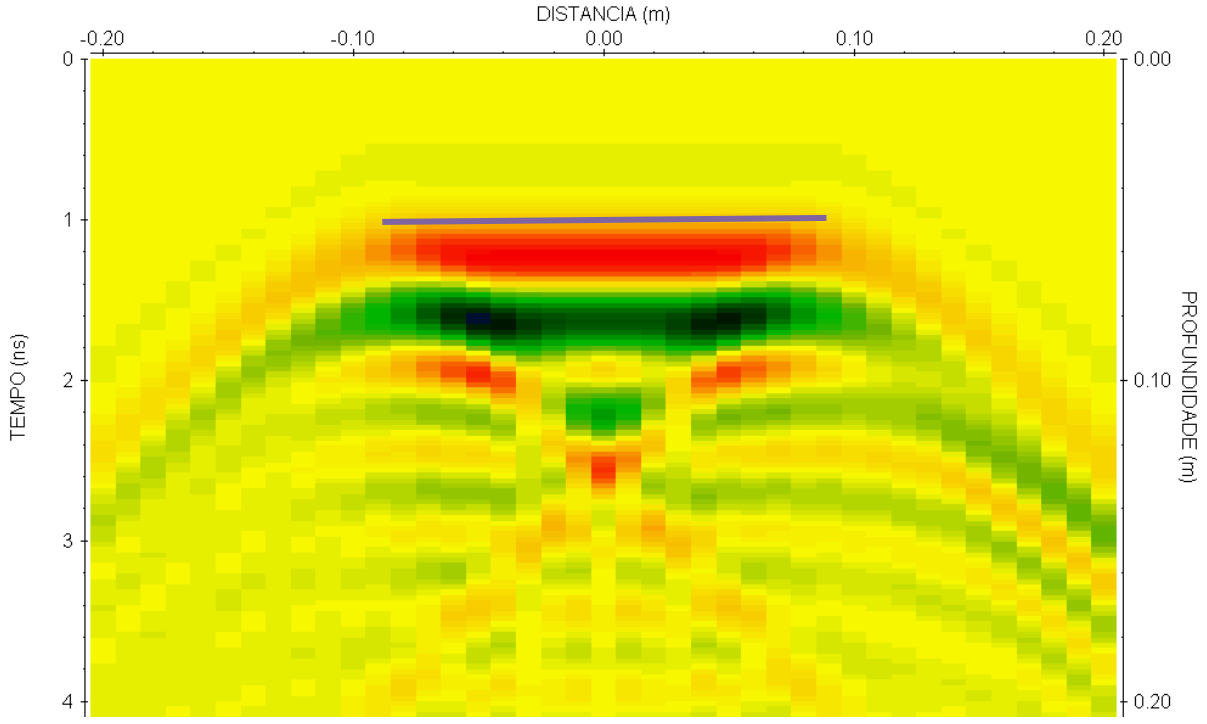



**Figura 14 –** Resposta GPR para a Figura 12, para uma frequência de 1GHz.

Se aplicarmos uma frequência maior a este modelo a resposta assemelha-se

a encontrada com antena de 400 MHz, em sua interpretação, porém as hipérboles podem ser vistas com maior nitidez com o modelo com maior frequência como pode ser visto na Figura 14.

### 3.2.3 Fissuras

Uma fissura, ou rachadura é uma pequena abertura em uma estrutura sólida. Sua presença pode prejudicar a estrutura do concreto com o aumento do espaço vazio gerado na estrutura e por possibilitar a entrada de agentes corrosivos que comprometerão a estrutura do concreto (SILVA, 1995).

Os agentes agressivos ao concreto, como: gás carbônico, chuva ácida, compostos salinos, dentre outros. São encontrados em maior proporção dependendo do local onde a estrutura de concreto está, são estes ambientes classificados em quatro tipos, Tabela 4, de acordo com o gral de agressividade do ambiente.

TABELA 4 Classe de agressividade ambiental

| **Classe de agressividade ambiental (CAA)** | **Agressividade** | **Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto** | **Risco de deterioração da estrutura** |
|---|---|---|---|
| I | Fraca | Rural | Insignificante |
| II | Moderada | Urbana | Pequena |
| III | Forte | Industrial | Grande |
| IV | Muito forte | Marinho | Elevada |

Fonte: ABNT (2004)

A identificação de fissuras é complicada por se tratar de algo em uma escala muito pequena, como pode ser observado na Tabela 5, por isso, estimar a profundidade de uma fissura não é possível, a menos que a fissura apresente uma abertura suficientemente grande para ser captada pelo sinal do GPR.

TABELA 5 Exigência de durabilidade relacionadas à fissuras em função das classes de agressividade ambiental

| Tipo de concreto estrutural | CAA e tipo de proteção | Exigências relativas à fissuração |
|---|---|---|
| Concreto simples | CAA I a CAA IV | Não há |
| Concreto armado | CAA I | Abertura máxima das fissuras (AMF) ≤ 4 mm |
| | CAA II a CAA III | (AMF) ≤ 3 mm |
| | CAA IV | (AMF) ≤2 mm |

Fonte: adaptado de ABNT (2004)

Se considerarmos que esta fissura é uma lâmina preenchida com ar, no interior de um ambiente com classe de agressividade ambiental I, como ilustra a Tabela 5, sua abertura deve ser de no máximo 0,004m. A Figura 15 ilustra o modelo da fissura com abertura de 4 mm para três fissuras diferentes, a fissura **A** com preenchimento de ar e 5 cm de profundidade, a fissura **B** com preenchimento de água e a mesma profundidade, e a fissura **C** com o preenchimento também de água mas com uma profundidade de 10 cm.

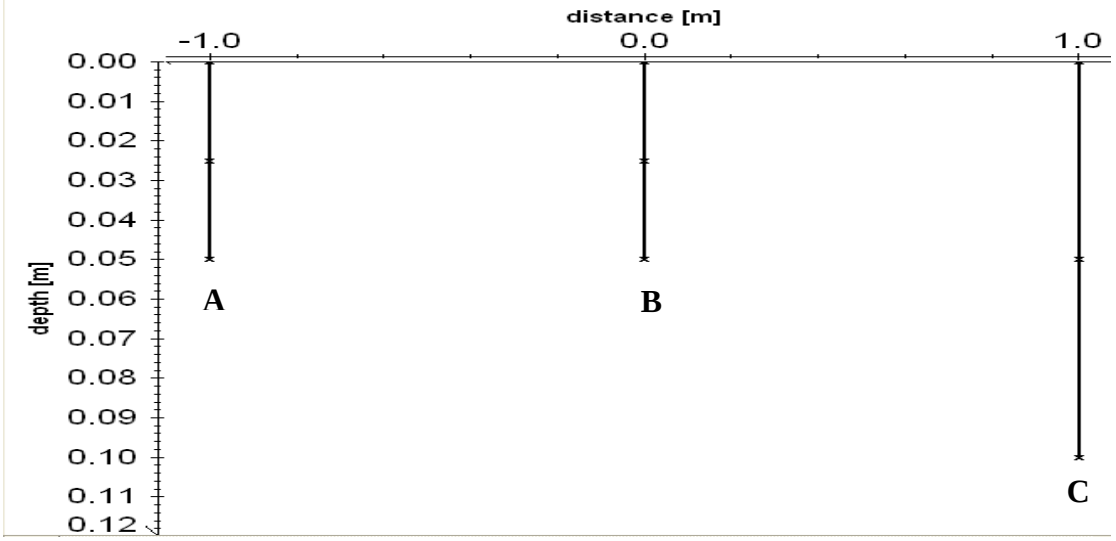



**Figura 15 –** Modelo com 3 fissuras com abertura de 4mm, sendo A preenchida com ar e as demais **B** e **C** com água. Há também uma variação na profundidade, as fissuras **A** e **B** com 0,05m e a **C** com 0,1m.

A antena de 400 MHz, aplicada a este modelo de fissuras apresenta resposta proveitosa. A Figura 16 mostra o resultado com onda plana para o modelo da Figura 15. É possível identificar cada uma das fissuras. Note que as fissuras **B** e **C** têm um sinal mais forte do que a fissura **A**.

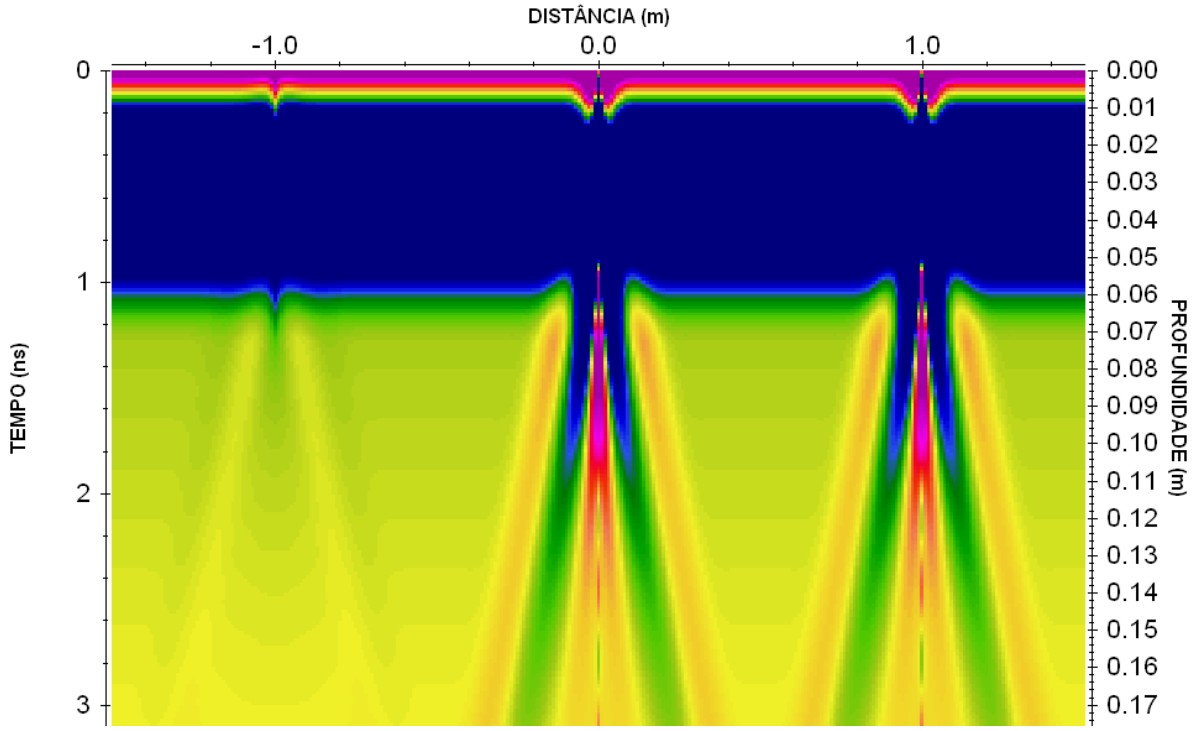



**Figura 16** – Ilustração do modelo anterior, para onda plana, com uma frequência de 400 MHz.

Se ao mesmo modelo for aplicada uma frequência de 1.6 GHz, o esperado é uma resposta com melhor resolução. O que pode ser observado na Figura 17 Porém, este modelo pode induzir ao erro por apresentar uma forte reverberação do sinal, o que pode ser confundido com camadas horizontais. Mesmo com a frequência mais alta não é possível estimar a profundidade da fissura.

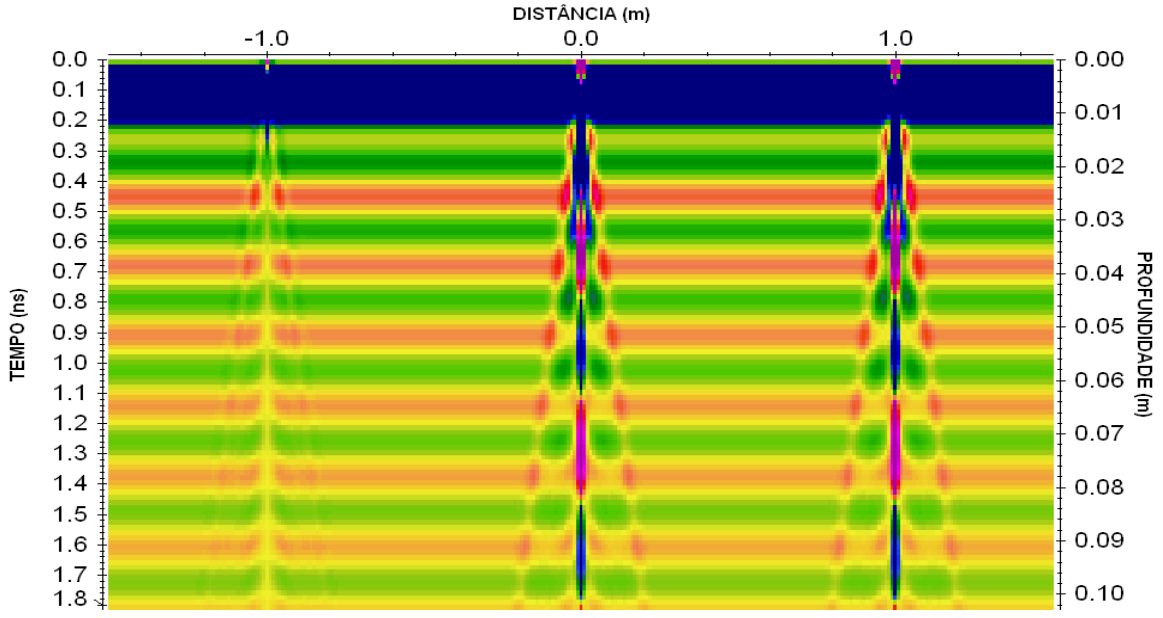


**Figura 17 -** Modelo para uma frequência de 1600 MHz, onda plana.

O modelo de onda plana tem uma maior capacidade de perceber pontos difratores e planos inclinados, o que não descreve este tipo de problema.

### 3.2.4 Pavimento de concreto

A Figura 18 mostra um perfil GPR de dados reais (GSSI, 2006), de um perfil de rodovia pavimentada com concreto. Os dados foram adquiridos com um SIR-3000 e uma antena de 900 MHz. Este perfil mostra vigas de aço, que cederam devido a presença de um extenso vazio na estrutura de concreto.

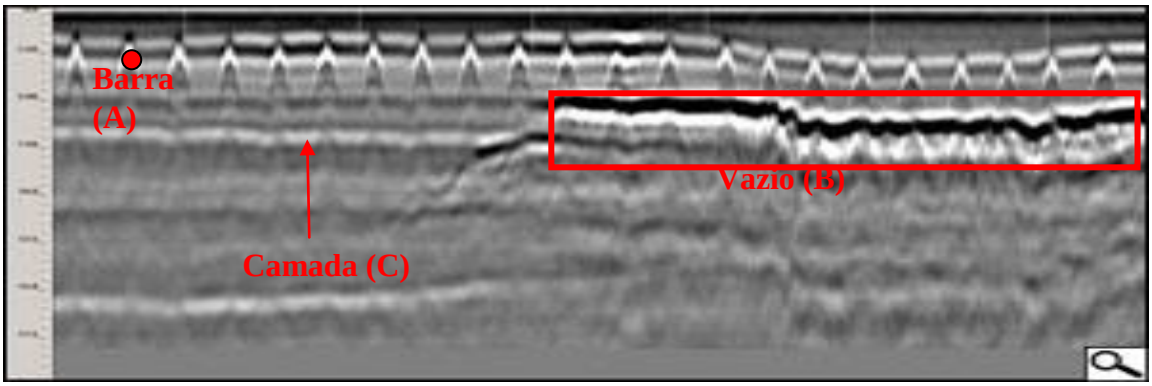



**Figura 18 –** Perfil de estrada com: barras de aço (**A**), vazio (**B**) e uma camada em profundidade (**C**).

Com esta figura por base foi desenvolvido um modelo computacional com as três características principais da Figura 18, vergalhões, uma camada em profundidade e um vazio. Este modelo equivale a um perfil de dois metros, com aproximadamente um metro de profundidade, como pode ser visto na Figura 19.

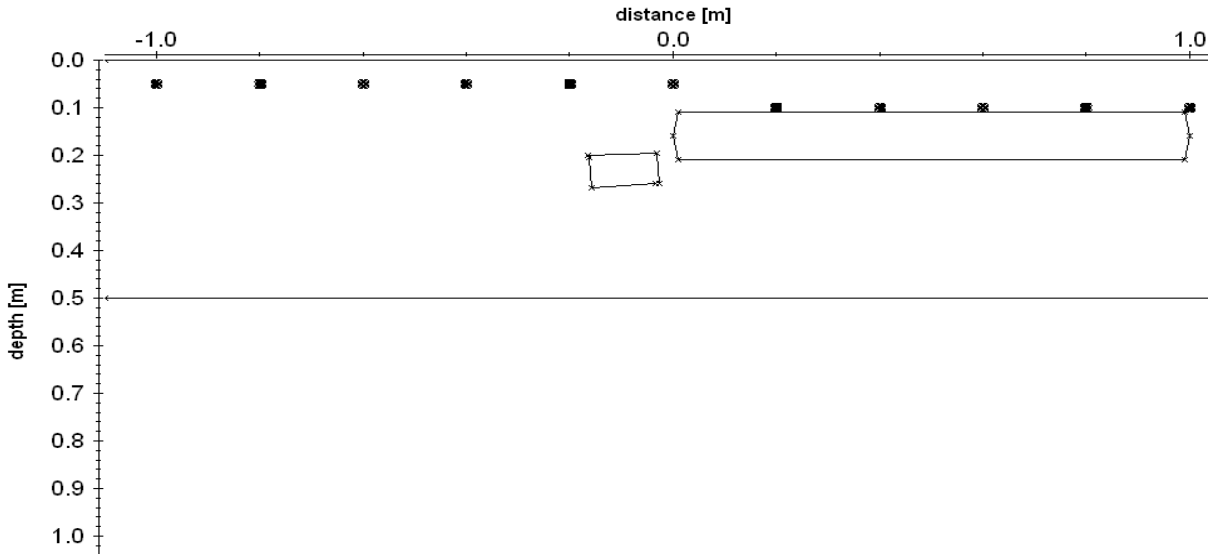



**Figura 19** – Modelo de estrada com barras de aço, mudança de ambiente em profundidade e vazio na estrutura de concreto.

As três respostas características no concreto podem ser visualizadas com clareza na Figura 20, para uma frequência de 900 MHz, o que indica uma boa estimativa deste modelo construído com o software Reflexw. Outro modelo apresentado na Figura 21 propõe a leitura do mesmo ambiente com uma antena de 400 MHz, para observar o tipo de resposta obtida com esta frequência.

Para a frequência de 400 MHz conseguimos estimar as características do vazio na estrutura de concreto sem muita dificuldade, as barras de aço podem ser identificadas mas a proximidade entre elas dificulta a visualização e a camada em profundidade pode ser vista, apesar da resposta das barras atenuar seu sinal.

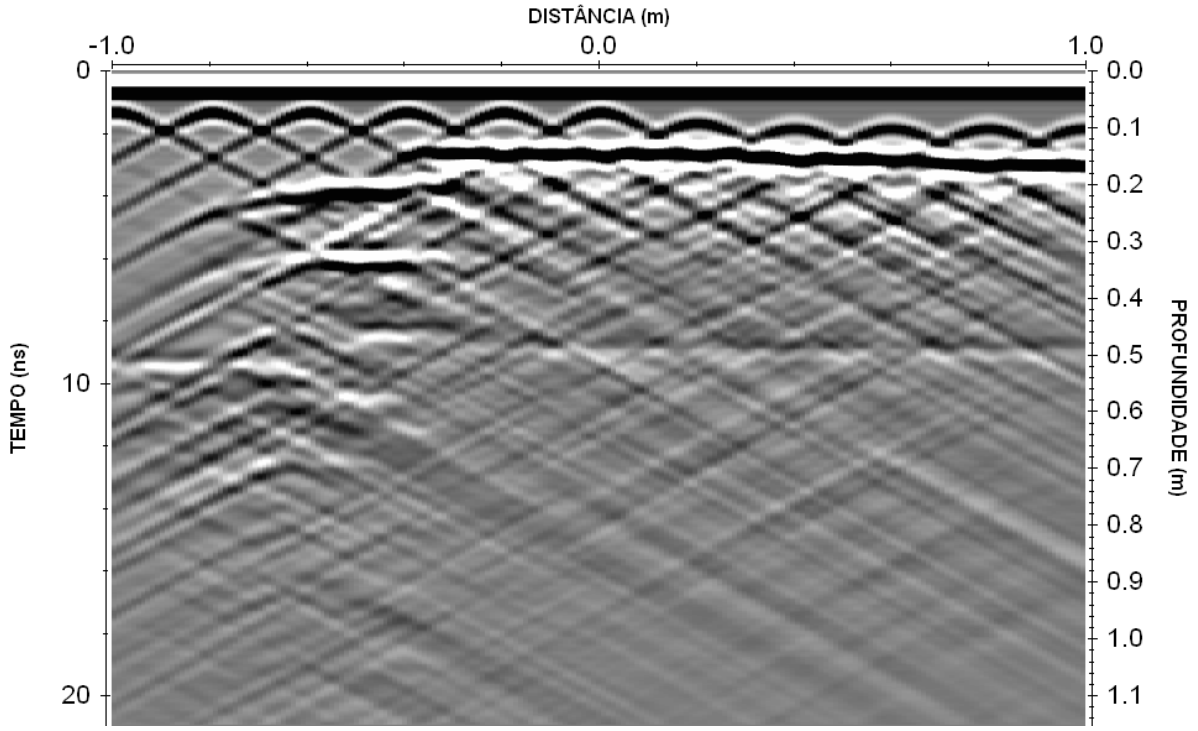



**Figura 20 –** Modelo para 900 MHz de um perfil de estrada com: vergalhão, vazio e camada em profundidade.

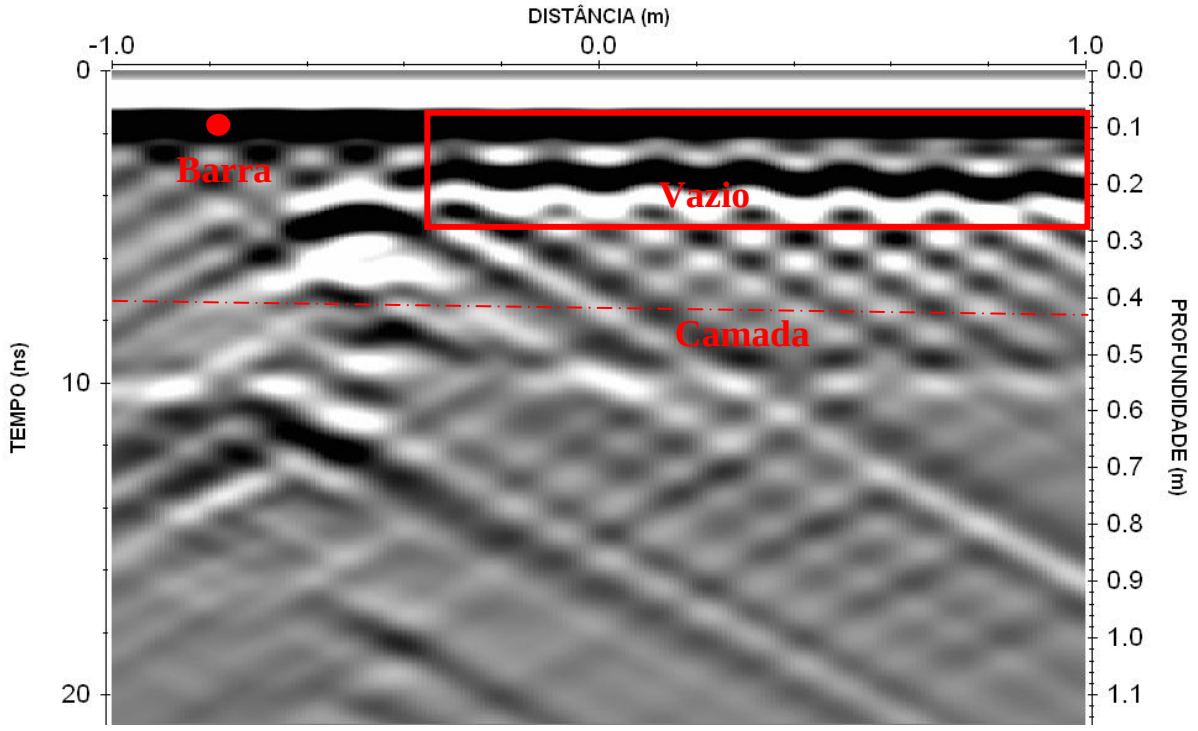



**Figura 21 –** Modelo anterior para uma antena de 400 MHz.

## 4. PROCESSAMENTO DE DADOS GPR

Tendo em vista, a vasta possibilidade de utilização do Georadar no diagnóstico de estruturas de concreto na Engenharia Civil e Geotecnia, a idéia inicial é testar as aplicações possíveis para uma antena de 400 MHz, Figura 22, no diagnóstico de estruturas de concreto armado, como por exemplo, vigas, lajes e pilares de concreto armado, pavimentos de pontes, e mesmo não esquecendo também a sua aplicação na Geotecnia em que este aparelho busca possíveis descontinuidades, vazios, no solo em que será construído um prédio por exemplo.

**Figura 22 –** Equipamento GSSI Sir-3000 e antena de 400 mhz.

Este trabalho prendeu-se na possibilidade de se verificar quais informações podemos tirar e detalhar de perfis de GPR, levantados de estruturas de concreto armado, sabendo que para a Engenharia Civil e Estrutural devemos sempre buscar conciliar, o nível máximo de precisão, com o mínimo custo possível, pois o custo é fator determinante em várias práticas. Como é conhecido de todos os geofísicos, levantamentos com Georadar tem custos muito baixos, pois conciliam velocidade na aquisição dos dados, imageamento interno de uma estrutura e não é um método invasivo (BRANDÃO, 1993), fatores estes que relacionados com o custo,

apresentam na maioria dos casos a melhor relação custo benefício o que é sempre o objetivo de um engenheiro civil (SILVA, 1995).

## 4.1 PROCESSAMENTO: ACERVO CENTRAL

O primeiro levantamento foi realizado na sala do Arquivo Central da Universidade Federal do Pará, pavimento térreo do prédio da Geofísica UFPA, local em que, apesar da recente reforma, apresentava rachaduras no piso. Procurou-se identificar o nível de resolução do radar para o tipo de patologia da rachadura, para uma antena de 400 MHz, ou seja, procurou-se tirar o máximo de informações possíveis dos perfis. Outro ponto importante, é que nos perfis levantados, foi detectada pelo aparelho, a presença das armaduras de armação da laje, fato que será apresentado nos perfis a seguir, juntamente com uma planta baixa do local para localização dos perfis levantados e localização da rachadura encontrada, além da direção de armação da laje no arquivo central.

Os dados apresentados foram processados através do software ReflexW com as seguintes etapas:

Correção da onda aérea para o tempo zero. O equipamento GPR emite um pulso que leva um tempo mínimo para alcançar o solo, este tempo é um ruído e pode alterar a profundidade do alvo pretendido no perfil radar grama, para corrigir esse pulso deve ser aplicado o ***muting*** que será aplicado de forma manual pelo operador com ajuda da função ***wiggle window*** que mostra um pulso do radar grama.

Através do ***Dewow*** (***subtract-mean***), um valor médio (***running average***) é calculado para cada traço de acordo com a janela de tempo escolhida. Este filtro pode ser usado para eliminar uma boa parte de baixas frequências associadas à saturação do sistema de registro devido ás grandes amplitudes das ondas diretas no ar e no solo. Para este propósito, o intervalo da janela deve ser ajustado para aproximadamente o tamanho do pulso principal (***wavelet***) através da onda direta que pode ser visualizada em ***wiggle window***. Foi ajustado em 5 ns o valor da janela de tempo, em conformidade com o tamanho da wavelet (MESSINGER,2004;STRANNEBY,2001).

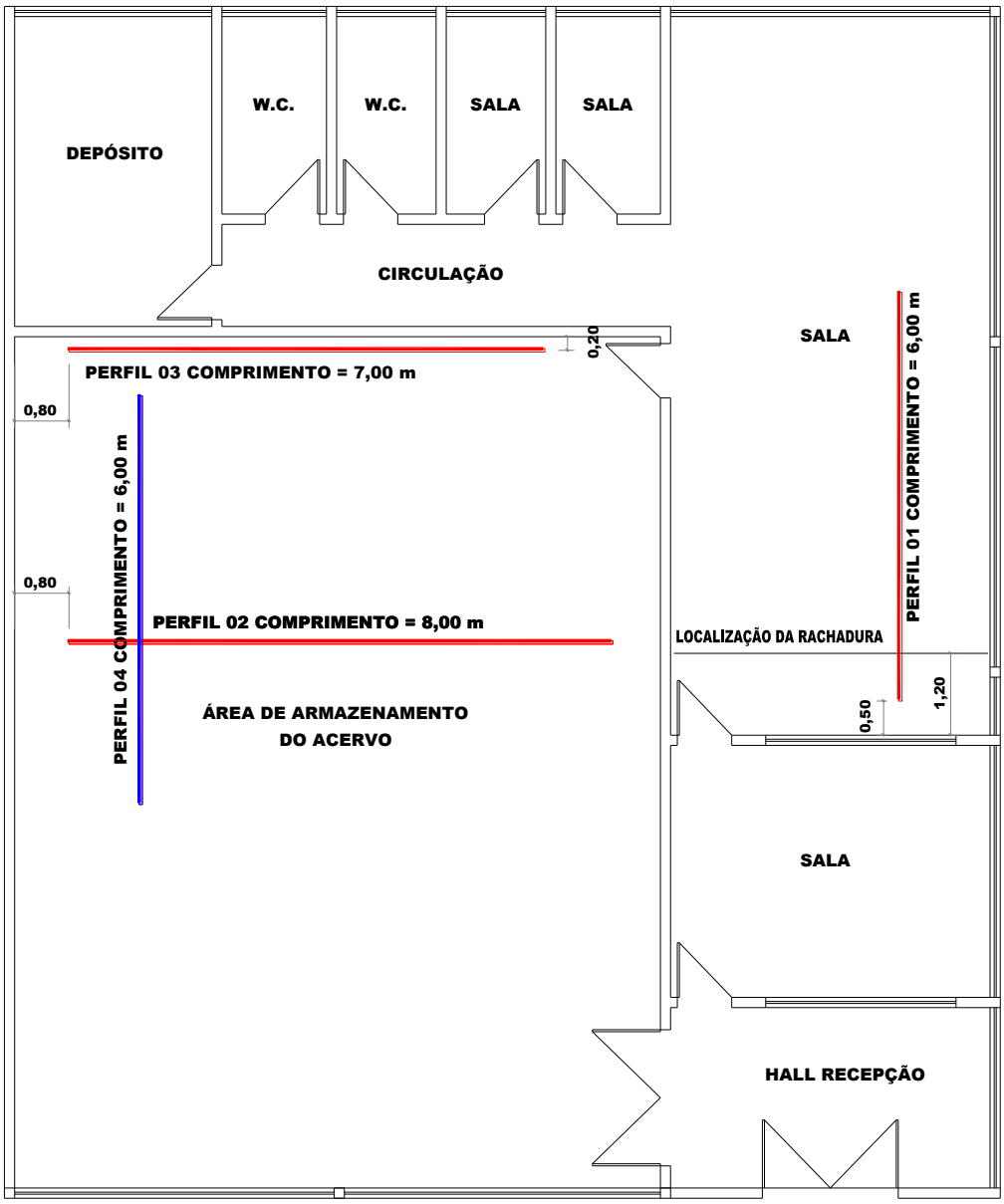
Para retirar ruídos de baixa e alta frequência dos dados utilizou-se um **filtro Passa-Banda**. Como a antena utilizada foi de 400 MHz (frequência central), a concentração maior de energia no espectro se encontra entre a metade e o dobro deste valor, uma vez que a Terra comporta-se como um filtro dispersando as frequências. O filtro foi desenhado em formato trapezoidal (BRANDWOOD, 2003).

Eventos que mergulham (inclinação das camadas) em um Plano (**t,x**), sendo **t** o tempo e **x** a direção do perfil, podem ser separados em um plano (**f,k**), em que f é a frequência e **k** é um pulso de onda, com dimensões iguais ao inverso do metro (1/m). A **Migração de Stolt** foi utilizada para colapsar difrações e retirar possíveis eventos cruzados localizando os objetos em sua posições reais. Para realizar essa migração é necessário conhecer a velocidade das ondas, que pode ser estimada por meio das superposições de hipérboles.

Na Figura 23, a seguir, temos uma planta baixa do local com a localização dos perfis apresentados e descrição dos locais que foram considerados no levantamento.

Na Figura 24 temos o perfil 01, com suas referidas anomalias, para uma profundidade aproximada de 2m. Nesta figura, não é possível delimitar as dimensões da laje de concreto. Porém, a resposta é suficiente para identificar que não será necessário observar uma profundidade superior a 0,5m uma vez que as lajes têm, geralmente, espessuras inferiores a este valor.

No caso do perfil 01, temos respostas que se assemelham ao exemplo do tópico 3.2.2, o que pode indicar a presença de vazios na estrutura, mas as anomalias na posição **x** aproximadamente 1m e 2,6m, geram respostas também semelhantes à resposta para uma fundação de concreto com duas barras de aço paralelas a essa fundação. Quanto às demais, aparentam ser realmente falhas na concretagem da laje. Na Figura 25 temos os dados após processamento, onde temos as anomalias de forma mais pontual e restrita aos pontos anômalos de interesse, como as bordas das zonas de vazio.




**PLANTA BAIXA - ACERVO CENTRAL**

**Figura 23** – Planta Baixa da área do acervo central, com descrição e localização do trabalho.

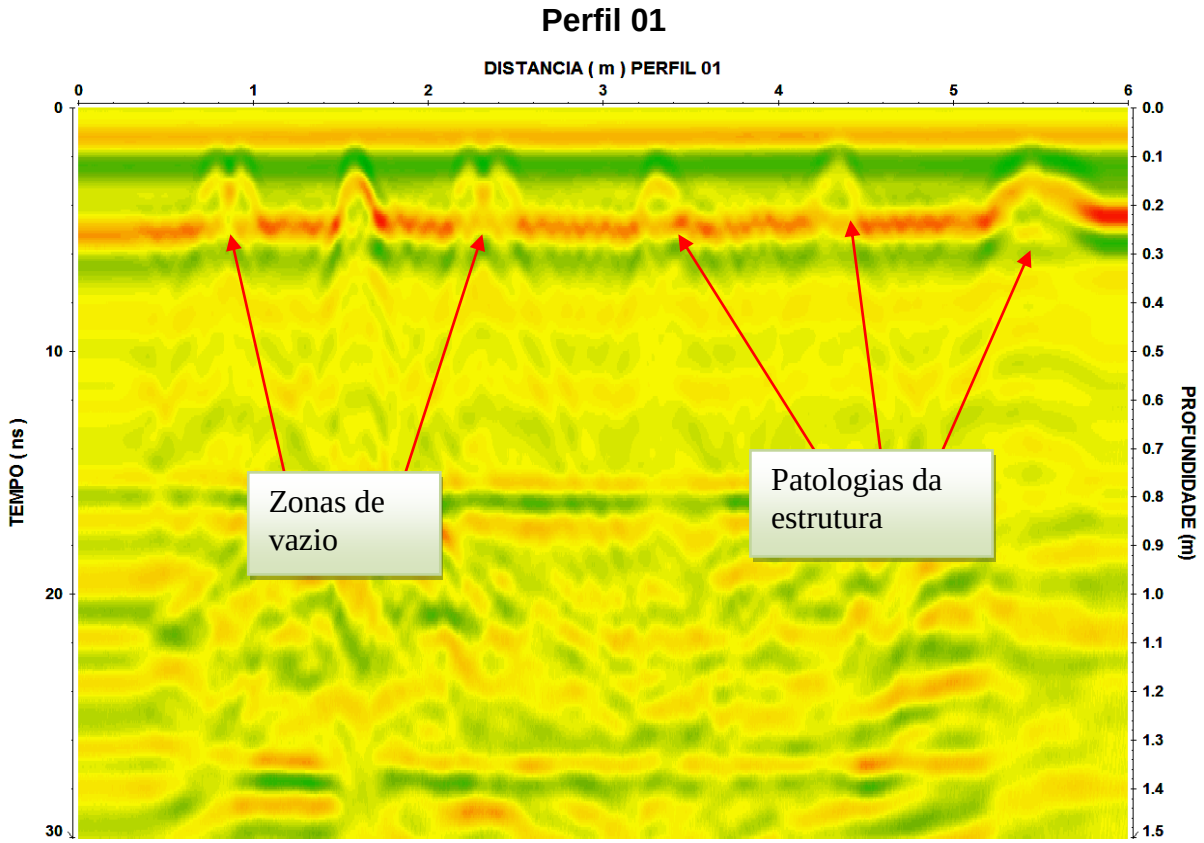



**Figura 24 -** Perfil 400 MHz, para amostra de 45ns.

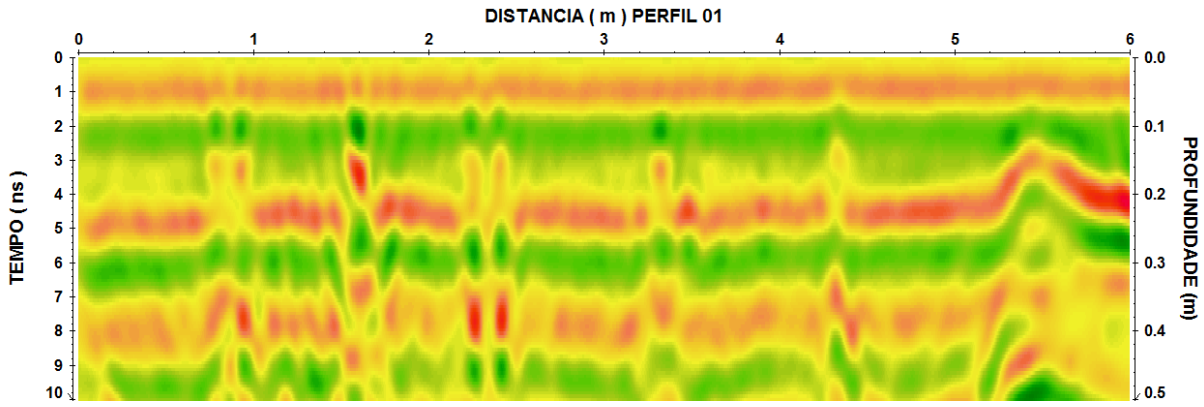



**Figura 25 –** Perfil 400 MHz, após processamento.

Na Figura 26 é mostrado o perfil dois, com as dimensões semelhantes as da Figura 24. O perfil 02 é uma linha de 8m e sua posição é perpendicular as barras de reforço da laje, em uma posição privilegiada para identificá-las. As barras de aço apresentam uma anomalia tão acentuada no dado GPR.

A antena de 400 MHz identificou as barras de aço nos pontos **X** espaçadas de aproximadamente 0,2m e em 4,2m, aproximadamente, uma anomalia formando

uma hipérbole maior e abaixo das demais, esta provavelmente é uma viga mestra, que reforça as demais vigas. Nos pontos a 1,2m e 5m, aproximadamente, observamos respostas características para regiões de encontro de lajes pré-moldadas mas isto não se caracteriza como um problema na estrutura. Na Figura 27 os dados apresentados já receberam os devidos processamentos.

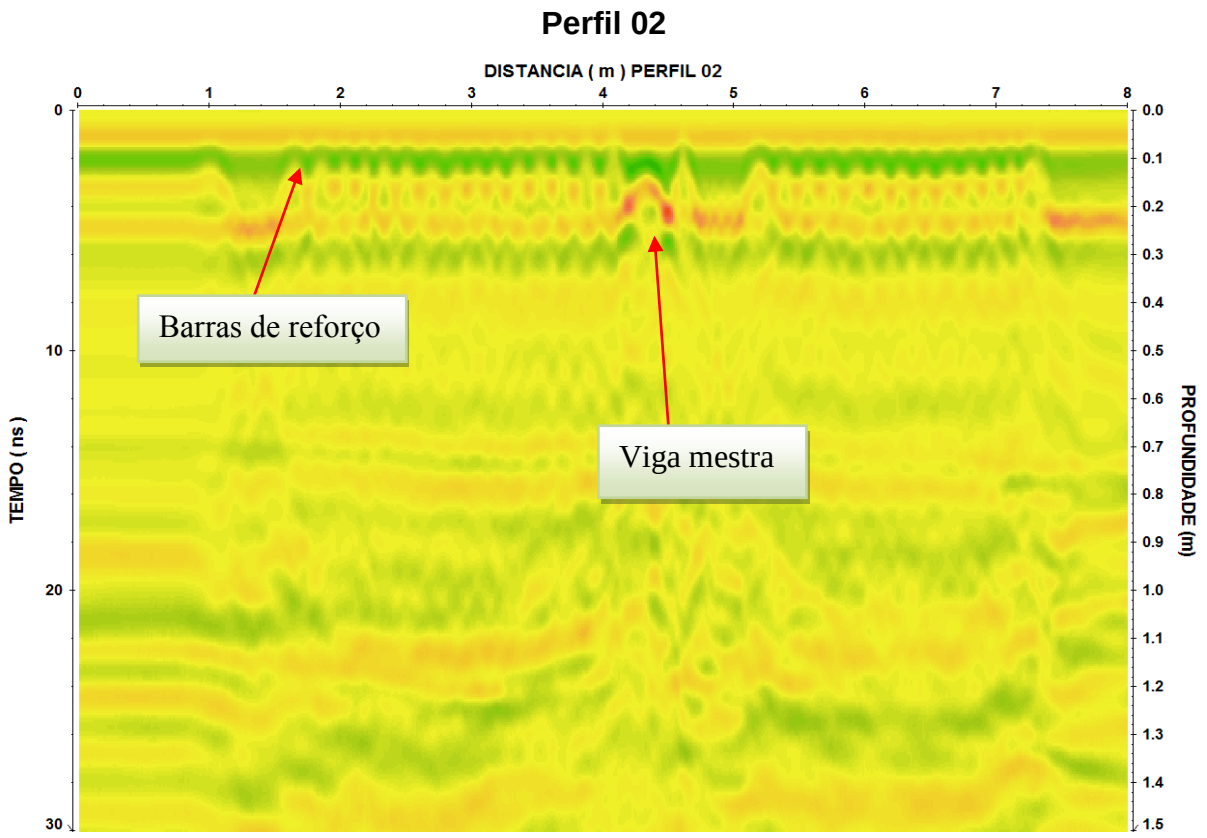



**Figura 26 –** Perfil 400 MHz, para amostra de 40 ns.

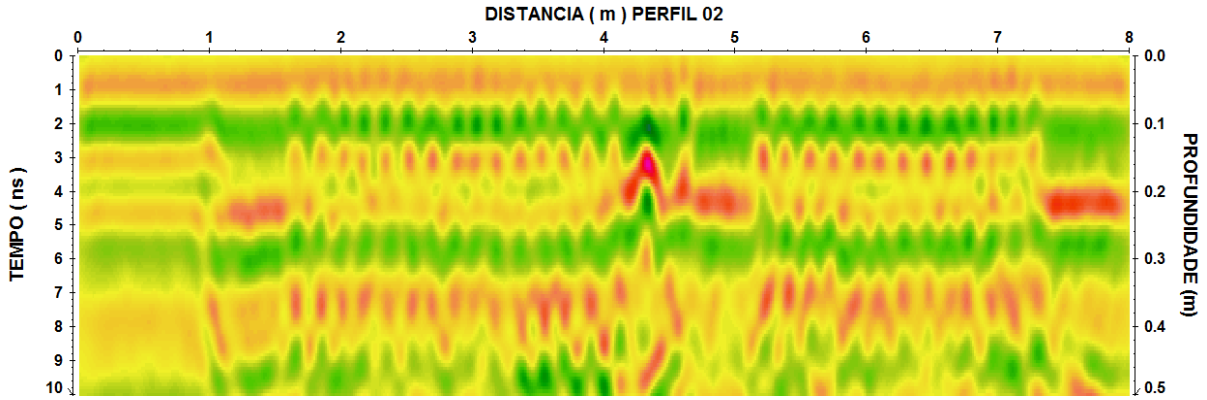



**Figura 27 –** Perfil 400 MHz, após processamento.

Na Figura 28, temos o perfil 03, com sua devida resposta para um levantamento GPR. Este perfil está paralelo ao perfil 02, então deve apresentar uma

resposta semelhante, referente as barras de aço e à localização da viga mestra. Nos pontos referentes as barras de aço, elas foram encontradas da mesma forma, mas a viga mestra apresenta uma resposta um pouco diferente, isso se deve a um possível tencionamento nesta barra devido a má formação na fase de concretagem ou a esforço excessivo devido a má distribuição de peso sobre a barra (Figura 29).

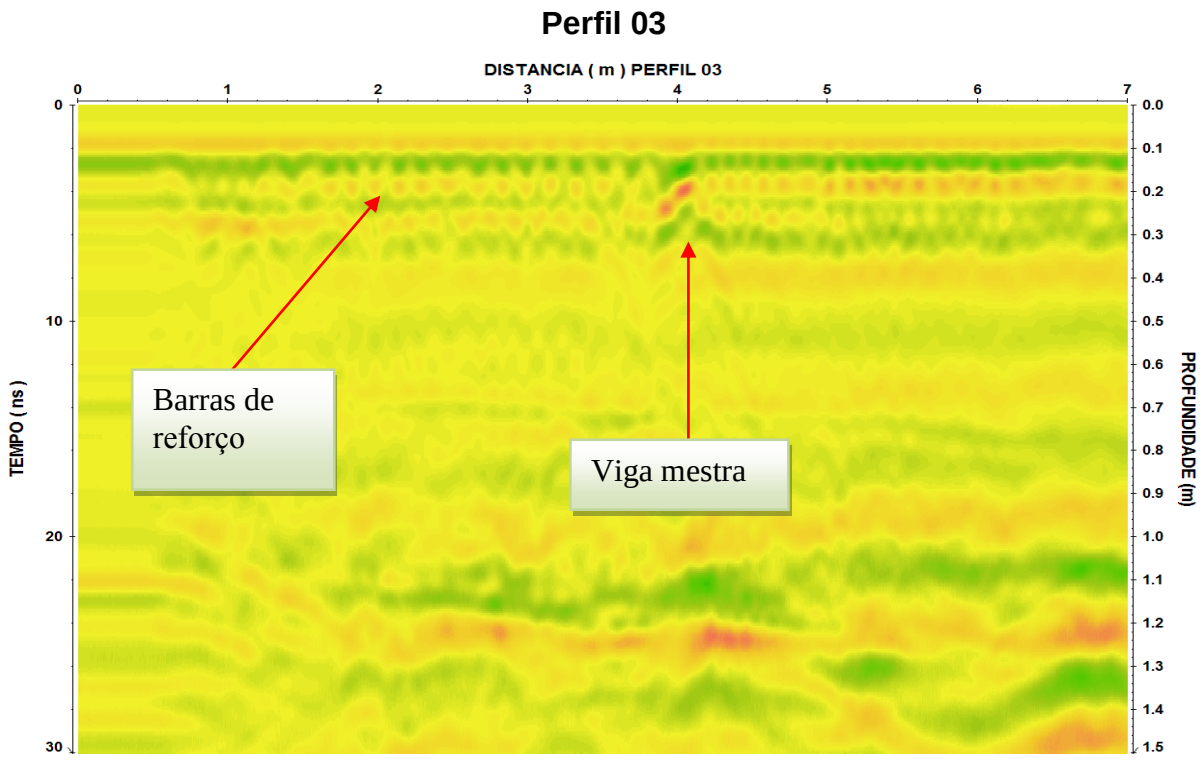



**Figura 28** – Perfil 400 MHz, para amostra de 40 ns.

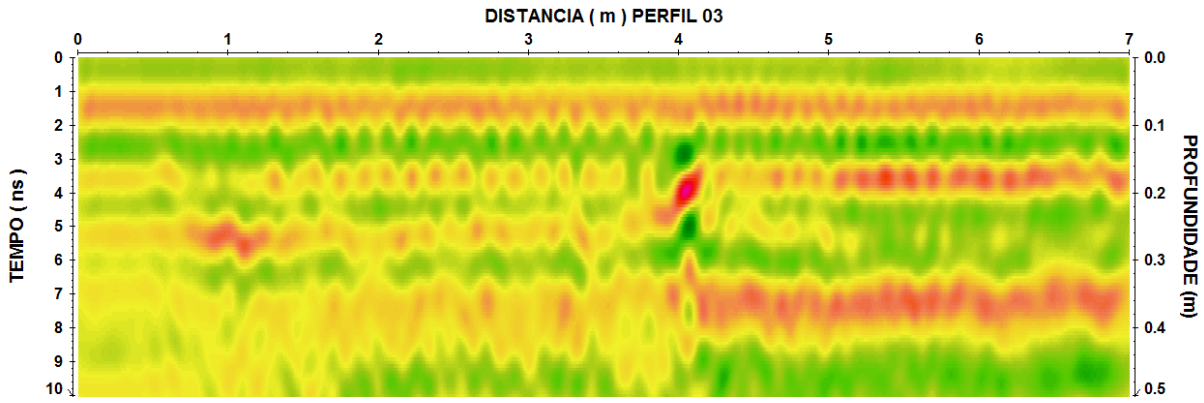



**Figura 29** – Perfil 400 MHz, após processamento.

Na Figura 30 esta a resposta do perfil 04. O perfil 01 assemelha-se ao perfil 04, permitindo comparação entre eles. Os vazios podem ser vistos nos dois perfis o

que indica que percorrem toda a sala. A rachadura também pode ser vista nos dois perfis.

O perfil 04 pode ser visto após processamento na Figura 31.

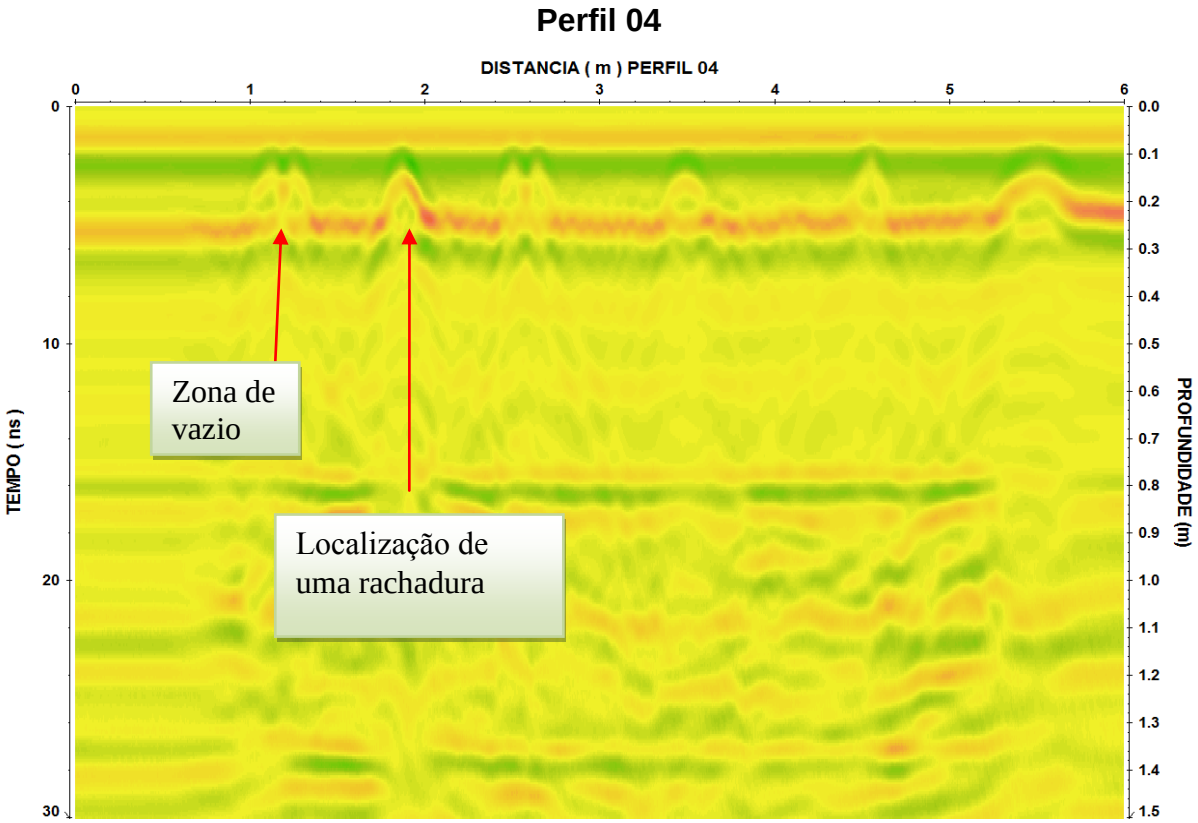



**Figura 30 –** Perfil 400 MHz, para amostra de 40 ns.

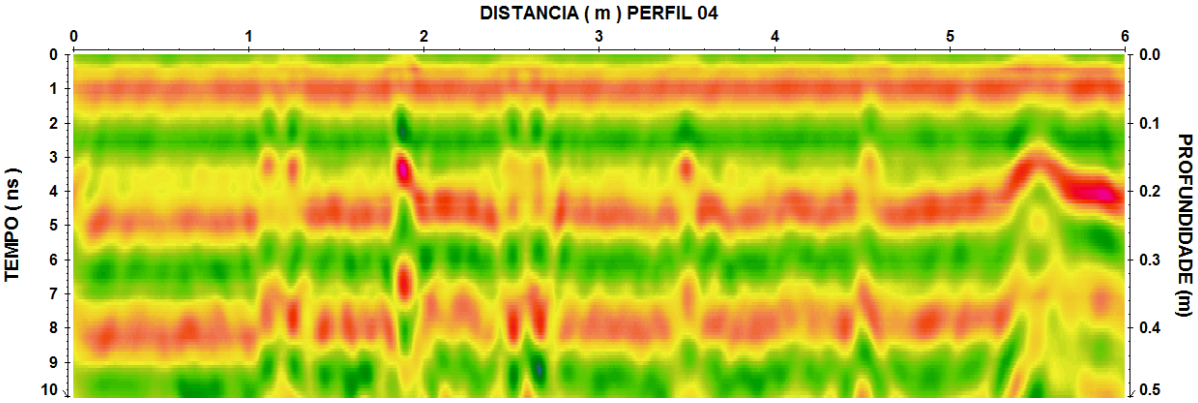



**Figura 31 –** Perfil 400 MHz, após processamento.

# 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O Trabalho aplicado mostrou que a antena de 400 MHz tem uma aplicação muito boa para identificar barras de aço e zonas de vazio, mas também que é muito limitada para delimitar as dimensões destes alvos.

Mostrou também que a penetração da onda eletromagnética no concreto é maior. O que pode ser útil para identificar alvos mais profundos, apesar da menor resolução da resposta GPR.

As vigas metálicas podem ser mapeadas mesmo com a antena de 400 MHz, identificando sua posição e estimando sua profundidade. Porem, mesmo com uma antena de maior frequência não é possível identificar vigas dispostas verticalmente porque a barra posicionada acima absorve muito do sinal.

Os vazios na estrutura podem ser identificados com a antena de 400 MHz. Com a limitação de não poder identificar com precisão a espessura destes espaços ocos na estrutura, para vazios pequenos.

Apesar de identificar a presença de barras de aço, vazios na estrutura e algumas rachaduras, a antena de 400 MHz apresenta muita dificuldade em dar as dimensões destes corpos na estrutura de concreto, principalmente as fissuras que por apresentar dimensões muito pequenas é de difícil identificação.

## REFERÊNCIAS

ABNT. **Projeto de estruturas de concreto-procedimento**. 2004, 225f. Disponível em: <http://www.cct.uema.br/Normas/NBR6118_2003Corr-Projeto de estruturas de concreto - Procedimentos.pdf>. Acesso em : 20 jan 2009.

ANNAN, A. P. **Ground penetration radar workshop notes**. [S.l.]: Sensors & Software Inc., 1992. p. 130. ( Internal Report).

BELÉM, A. N., **Caracterização bidimensional de canais de radio através de diferenças finitas no domínio do tempo.** 2001. 124f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Eletrônica, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais – MG, 2001.

BORGES,W.R. **Investigação Geofísica na Borda da Bacia Sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e eletroresistividade.** 2002. 60 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

BOTELHO, Manoel Henrique Campos; MARCHETTI, Osvaldemar. **Concreto Armado, eu te amo.** 2. ed. São Paulo: Editora Blücher, 2007. V. 2

BRANDÃO, Ivens Coimbra. **Fundamentos Para o Cálculo em Concreto Armado Aplicados à Flexão Pura**. Belém: Universidade Federal do Pará: CEJUP, 1993.

BRANDWOOD, D. **Fourier Trasforms in Radar and Signal Processing**. London: Artech House. 2003. 212 p.

COSTA, F. P., **Solução numérica de equações diferenciais**. Santa Cruz: Departamento de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual de Santa Cruz – SC, 2002. 22p. Mini curso.

DANIELS, D.J. **Surface penetrating radar**. London: The Institution of Electrical Engineers, 1996. 300p.

GSSI. **Antenas**: the Difference is the Data. [s.1], 2006. 4f. Disponível em: <http://www.alphageofisica.com.br>. Acesso em : 20 jan 2009.

LIMA, C. B. **Análise de dispositivos eletromagnéticos para hipertemia usando o método FDTD.** 2006. Tese (Doutorado) - PEEL/UFSC, Santa Catarina, 2006.

LUIZ, J.G.**Notas de Aulas sobre o Método Georadar**. Belém: Universidade Federal do Pará, 1998. 8p.

MELO,Marina da Silveira. **Geofisica aplicada à arqueologia:investigação no sítio Histórico engenho Murutucu**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Centro de Geociências, UFPA, Belém, 2007.

MESSINGER, J. Effective automatic picking of traveltime data with high precision. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUND PENETRATING RADAR, 10., Delft, 2004. The Netherlands: [s.n.], 2004. 4p.

PORSANI, J. L. **Ground Penetration Radar (GPR):** Proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado-SP. 1999. 145f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campos de Rio Claro- SP, 1999.

PRADO, R. L. **A sísmica de reflexão e o radar de penetração no solo na investigação geológico-geotécnica em ambientes urbanos**: Um estudo na cidade de São Paulo – SP. 2000. 174f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campos de Rio Claro- SP, 2000.

REYNOLDS, J.M. **An introduction to applied and environmental geophysics.** Baffins Lane, JohnWiley & Sons Ltd.,1997. p. 681-749.

SANDMEIER, K. J. **Windows$^{TM}$ 9x/NT-program for the processing of seismic, acoustic or electromagnetic reflection, refraction and transmission data.** Germany, 2001.

SANDMEIER, K. J. **ReflexW Version 3.01. Program for processing of seismic, acoustic or eletromagnetic reflection, refrectiona and trasmission data:** Manual do software. Karlsrube, Germany, 2003. 345p.

SANTOS, Robson Lima. **Otimização de perfis de reflexão GPR sobre manilhas de concreto e tubulações de PVC instaladas no sítio controlado de geofísica rasa do IAG/ USP**. 2006. 130f. Dissertação (Mestrado) - IAG/USP, São Paulo. 2006

SILVA, Paulo Fernando Araújo. **Durabilidade das estruturas de concreto aparente em atmosfera urbana.** São Paulo : Pini, 1995.

STRANNEBY, D. **Digital Signal Processing.** Oxford: Butterworth-Heinemann Linacre House, Jordan Hill, 2001. 239 p.

STRATTON, J. A., **Eletromagnetic Theory**. New York: McGraw Hill Book Company, 1941 615p.

TAFLOVE, A. ; BRODWIN, E., Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time-dependent Maxwell's equation . **IEEE Trans. Microwave Theory and techniques,** v. 23, p. 623-630, Aug, 1975.

WEXLER, A. Computation of electromagnetic fields. **IEEE Transaction Microwave Theory and Techniques**, v. 17, nº 8, p. 416-439, 1969.

YILMAZ, O. **Seismic Data Processing.** Tulsa: Society of Exploration Geophysics Press, 1987.526p.

ZEBKER, H. A.; VAN ZYL, J. J.; HELD, D. N.. Imaging radar polarimetry from wave synthesis. **Journal of Geophysical Research,** v.92, nº B1, p. 683-701, 1987.

ZENG,X.; MCMECHAN, G. A. GPR characterization of buried tanks and pipes. **Geophysics,** v. 62, n° 3, p. 797-806, 1987.