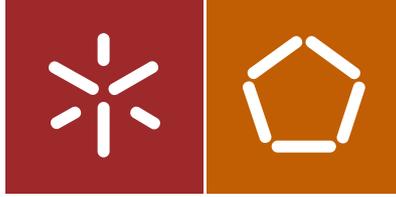




Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Andreia Filipa Torres Fernandes

Identificação de fendilhamento de pavimentos  
e propriedades volumétricas das misturas  
betuminosas utilizando um Georadar



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Andreia Filipa Torres Fernandes

Identificação de fendilhamento de pavimentos  
e propriedades volumétricas das misturas  
betuminosas utilizando um Georadar

Dissertação de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao  
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do  
Professor Doutor Jorge Carvalho Pais

e coorientação do  
Professor Doutor Francisco Manuel Carvalho Pinto  
Fernandes

## **AGRADECIMENTOS**

O espaço limitado desta secção de agradecimentos, seguramente, não me permite agradecer, como devia, a todas as pessoas que, ao longo do meu percurso em Engenharia Civil, me ajudaram, direta ou indiretamente, a cumprir os meus objetivos e a realizar mais esta etapa da minha formação académica. Desta forma, deixo apenas algumas palavras, poucas, mas um sentido e profundo sentimento de reconhecido agradecimento.

Ao Professor Doutor Jorge Carvalho Pais não só por ter sido responsável pela sugestão do tema, nomeadamente o estudo do georadar, mas também pela sua coordenação relativamente ao presente trabalho. A sua disponibilidade e participação mantiveram-se ao longo do seu desenvolvimento, mesmo quando não foi possível cumprir os prazos estabelecidos. Deste modo, ressalvo a sua orientação e apoio que em muito elevaram os meus conhecimentos científicos e, sem dúvida, estimularam o meu desejo de querer, sempre, saber mais e fazer melhor. Por tudo isto, deixo aqui os meus sinceros agradecimentos.

Ao Professor Doutor Francisco Manuel Carvalho Pinto Fernandes, coorientador deste trabalho, agradeço a disponibilidade para todo o tipo de dúvidas, a sua paciência, a sua leitura atenta na revisão do texto, as suas sugestões e correções, assim como o ânimo transmitido durante este trabalho. Neste sentido, saliento o orgulho e privilégio de colaborar com uma pessoa que em tudo contribuiu para os estímulos e desafios na realização deste projeto.

À equipa do laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho, o meu agradecimento pela amabilidade, amizade e boa disposição em todos os momentos.

À minha família, em especial aos meus Pais, um enorme obrigada por acreditarem sempre em mim e naquilo que faço e por todos os ensinamentos de vida. Espero que esta etapa, que agora termino, possa, de alguma forma, retribuir e compensar todo o carinho, apoio e dedicação que, constantemente, me oferecem. A eles, dedico todo este trabalho.

E a todos aqueles para quem o meu tempo disponível foi muito menos do que aquilo que seria justo.



## **RESUMO**

O presente trabalho encontra justificação no facto da técnica abordada neste projeto ainda não ter em Portugal a utilização que já acontece noutros países europeus. Assim, pretende-se reunir informação sobre o equipamento e aplicações associadas ao georadar, e aplicar esses conhecimentos na realização de ensaios de laboratório, na tentativa de detetar humidade e fendilhamento à superfície ou subterrâneo em pavimentos, utilizando o georadar.

O GPR é uma técnica de sensoriamento remoto que emprega ondas eletromagnéticas para investigar a subsuperfície. Tal como o seu nome indica, a gama de frequência GPR situa-se dentro da onda de radar, aproximadamente entre 10 MHz e 2 GHz. A realização de ações com GPR implicam a colocação de uma antena transmissora colocada acoplada ao chão ou suspensa que enviará os impulsos magnéticos para o solo. Estes impulsos são parcialmente refletidos em mudanças nas propriedades dos materiais elétricos no subsolo. Os sinais eletromagnéticos refletidos são registados por uma antena recetora pronta para processamento.

Consequentemente, após uma abordagem histórica do aparecimento do georadar, em que se mostrará a forma como outros países já utilizam o GPR para as mais diversas tarefas, torna-se de extrema relevância, abordar quer o equipamento em si quer as aplicações que o mesmo permite realizar.

Para isso, foi imprescindível a realização de ensaios laboratoriais que pudessem comprovar, ou não, a possibilidade de deteção de humidade e fendilhamento à superfície ou subterrâneo em pavimentos, utilizando o georadar.

**Palavras-chave:** Georadar, pavimentos, métodos não destrutivos, fendilhamento, humidade.



## **ABSTRACT**

This study is justified by the fact that technique used in this project has not yet in Portugal the use what already happens in other European countries. Thus, this work intends to join information about the equipment and applications associated with the GPR, and apply those concepts to carry out laboratory tests in an attempt to detect moisture and cracking in road pavements, using the GPR.

The GPR is a remote sensing technique that uses electromagnetic waves to investigate the subsurface. As its name suggests, the range of GPR frequency is within the radar wave, approximately 10 MHz and 2 GHz. The development of activities with GPR involves the application of a transmitting antenna attached to the ground or suspended to send magnetic impulses to the ground. These pulses are partially reflected at changes in electrical properties of the materials of the underground. The reflected electromagnetic signals are recorded by a receiving antenna ready for processing.

Consequently, after a historical approach to the use of the georadar, in which show how other the countries are using GPR for many different tasks, it becomes extremely relevant to address whether the equipment itself or the applications enables the development of such measurements.

Therefore, it was essential to carry out laboratory tests that proved the possibility for detect moisture and cracks on the surface or inside the pavements using GPR.

**Keywords:** Georadar, nondestructive tests, pavements, cracking, moisture.



## ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. Enquadramento</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2. Objetivo do trabalho</b> .....	<b>4</b>
<b>1.3. Organização da dissertação</b> .....	<b>4</b>
<b>2. UTILIZAÇÃO DO GEORADAR</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1. Descrição do georadar</b> .....	<b>5</b>
2.1.1. Tipos de antenas.....	6
2.1.2. Frequências das antenas.....	7
2.1.3. Sistema Radar.....	8
<b>2.2. Procedimento de análise</b> .....	<b>9</b>
<b>2.3. Aplicação do GPR em infraestruturas de transporte</b> .....	<b>15</b>
2.3.1. Densidade.....	18
2.3.2. Água nos solos.....	20
2.3.3. Espessuras das camadas.....	21
2.3.4. Espessura de pavimentos.....	27
2.3.5. Detecção de Patologias nos pavimentos.....	28
2.3.6. Fendilhação vertical.....	33
<b>3. ANÁLISE LABORATORIAL</b> .....	<b>35</b>
<b>3.1. Detecção de humidade em pavimentos através do GPR</b> .....	<b>35</b>
<b>3.2. Detecção de fendas em pavimentos através de GPR</b> .....	<b>48</b>
<b>4. ANÁLISE NUMÉRICA</b> .....	<b>54</b>
<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	<b>63</b>
<b>5.1. Trabalhos futuros</b> .....	<b>64</b>
<b>6. BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>65</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>68</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de antena GPR de contacto com a superfície (em cima) e suspensa (em baixo).....	6
Figura 2 - Descrição dos componentes de um sistema GPR acoplado ao terreno (Fernandes, 2006).....	9
Figura 3 - Exemplo da leitura de um pavimento com uma antena tipo “horn” (Saarenketo, 2006) .....	11
Figura 4 - Exemplo de um radargrama em várias escalas cromáticas (Costa, 2009).....	11
Figura 5 - Correlação entre variações no valor da superfície dielétrica e variações na percentagem de vazios (Scullion, Saarenketo, 2002). .....	19
Figura 6 - Perfil obtido com uma antena aérea georadar 1,0 GHz. (Saarenketo, 2006).....	22
Figura 7 - Radargrama das espessuras das camadas de um pavimento com uma antena de 900 MHR (Edwards, Mason, 2011). .....	26
Figura 8 - Radargrama das espessuras das camadas de um pavimento com uma antena de 1.5 GHz (Edwards, Mason, 2011) .....	26
Figura 9 - Detecção de segregação em mistura betuminosa a quente através do registo da variação da constante dielétrica avaliada com georadar (Sebesta e Scullion, 2002b in Saarenketo, 2006). .....	30
Figura 10 - Exemplo de utilização de georadar na determinação das causas da fissuração transversal (Saarenketo, 2006). .....	31
Figura 11 - Exemplo da pesquisa de Diamanti e Redman (2011), dados em GPR fendilhações. As secções transversais em GPR para 1000 (superior) e 250 MHz (inferior) de pavimentos com espessura de 350 mm.....	34
Figura 12 - Aspeto das lajetas utilizadas nos ensaios laboratoriais e pulverizador utilizado para salpicar a água sobre as lajetas. ....	36
Figura 13 – Traço individual típico das leituras realizadas sobre as lajetas.....	37
Figura 14 – Exemplo de radargrama (três leituras consecutivas e separadas nas lajetas).....	38
Figura 15 – Lajes 3 e 1, respetivamente, passadas duas horas do início do ensaio.....	38
Figura 16 – Lajes no segundo dia ao fim de uma hora.....	39
Figura 17 – Lajes no último dia ao fim de duas horas. ....	40
Figura 18 – Análise da humidade na laje 1. ....	41
Figura 19 – Análise da humidade na laje 2. ....	41
Figura 20 – Análise da humidade na laje 3. ....	42
Figura 21 – Análise da humidade na laje 4. ....	42

Figura 22 – Análise da humidade na laje 5. ....	42
Figura 23 – Análise da humidade na laje 6. ....	43
Figura 24 - Análise da humidade aos 0 minutos. ....	44
Figura 25 - Análise da humidade aos 5 minutos. ....	44
Figura 26 - Análise da humidade aos 15 minutos. ....	45
Figura 27 - Análise da humidade aos 60 minutos. ....	45
Figura 28 – Evolução da velocidade de propagação com a porosidade e a taxa de humidade prevista. (a) aos 5%, (b) aos 10%, (c) aos 20% e (d) aos 40%. ....	47
Figura 29 – Foto do equipamento utilizado: unidade de controlo, monitor e antena de 1.6GHz. ....	49
Figura 30 – Duas vigas colocadas paralelamente afastadas de (a) 5 mm e (b) 20 mm. ....	50
Figura 31 – Radargramas ilustrativos da passagem por uma fenda com (a) zero, (b) cinco e (c) sete milímetros de largura. ....	50
Figura 32 – Radargramas ilustrativos da passagem por uma fenda com (a) nove, (b) quinze e (c) vinte milímetros de largura. ....	50
Figura 33 – Vigas colocadas para simular uma fenda vertical ocorrida por baixo do pavimento (separação das vigas inferiores: 5 mm). ....	51
Figura 34 - Gráfico do afastamento entre as fendas. ....	52
Figura 35 – Radargrama da deteção de fendas sob uma camada betuminosa de vigas afastadas por um, sete e dez milímetros (da esquerda para a direita). ....	53
Figura 36 – Radargrama da deteção de fendas sob uma camada betuminosa de vigas afastadas por quinze, dezoito e vinte milímetros (da esquerda para a direita). ....	53
Figura 37 – Geometria do modelo introduzido no GprMax. ....	57
Figura 38 – Ficheiro feito em bloco de notas que é introduzido no programa GprMax2D. ....	59
Figura 39 – Caixa resultante da simulação numérica em Matlab. ....	60
Figura 40 – Radargramas das simulações da lajeta 1, ilustrando e comparando as situações de lajeta (a) seca, com (b) 5 %, (c) 10 %, (d) 20 % e (e) 40 % de humidade. ....	60
Figura 41 – Radargramas das simulações da lajeta 2, ilustrando e comparando as situações de lajeta (a) seca, com (b) 5 %, (c) 10 %, (d) 20 % e (e) 40 % de humidade. ....	60
Figura 42 – Radargramas das simulações da lajeta 3, ilustrando e comparando as situações de lajeta (a) seca, com (b) 5 %, (c) 10 %, (d) 20 % e (e) 40 % de humidade. ....	61
Figura 43 – Radargramas das simulações da lajeta 4, ilustrando e comparando as situações de lajeta (a) seca, com (b) 5 %, (c) 10 %, (d) 20 % e (e) 40 % de humidade. ....	61

Figura 44 – Radargramas das simulações da lajeta 5, ilustrando e comparando as situações de lajeta (a) seca, com (b) 5 %, (c) 10 %, (d) 20 % e (e) 40 % de humidade. ....	61
Figura 45 – Radargramas das simulações da lajeta 6, ilustrando e comparando as situações de lajeta (a) seca, com (b) 5 %, (c) 10 %, (d) 20 % e (e) 40 % de humidade. ....	61
Figura 46 - Análise dos resultados em Matlab. ....	62
Figura 47 - Gráfico da diferença de amplitudes. ....	62

## **LISTA DE ACRÓNIMOS**

GPR – Ground Penetrating Radar

EM – Impulso Eletromagnético

HMA – Hot Mix Asphalt

SIDARS – System Identification and Analysis of Subsurface Radar Signals

CMP – Common Mid Point

FHWA – Federal Highway Administration

GPS – Global Positioning System

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

## **LISTA DE ANEXOS**

Anexo 1 - Tabelas representativas das amplitudes.....	68
Anexo 2 - Tabelas para o cálculo da velocidade.....	70
Anexo 3 - Tabelas para o cálculo da constante dielétrica .....	73
Anexo 4 - Tabela para o cálculo das distâncias.....	75
Anexo 5 - Função Matlab utilizada para a obtenção dos resultados dos ficheiros gerados pela GprMax2D. ....	75



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento

O desenvolvimento económico, político e social de um país está diretamente ligado ao seu sistema de transportes. Nesses sistemas, o modo rodoviário é fundamental para o acesso de passageiros aos principais pontos de recolha e distribuição, garantindo assim a integração entre todos os meios de comunicação (Faria, 2010).

A conservação dos pavimentos rodoviários é já hoje bastante importante em Portugal, sendo presentemente indiscutível que um bom planeamento e gestão do seu estado de conservação aumenta a qualidade das operações, garantindo melhores condições de segurança e conforto, ao mesmo tempo que permite uma exploração nessas condições por mais tempo, com menores custos de conservação e reparação. Assim, conseguem-se cumprir os objetivos de qualquer entidade responsável por estas infraestruturas, com maiores proveitos a médio e longo prazo (Branco et al., 2008).

O conhecimento detalhado dos materiais constituintes dos pavimentos, e das condições em que se encontram, podem ser efetuados através do recurso ao georadar (GPR – Ground Penetrating Radar), tendo em conta métodos de inspeção não destrutivos que possam ser operados a velocidades correntes, com um mínimo de implicações a nível dos utentes, de modo rápido, económico e preciso, tanto ao nível de projeto como ao nível de gestão de redes. Estes aspetos são fundamentais para a gestão dos pavimentos rodoviários, pelo que surgiu a necessidade de os caracterizar com recurso a métodos não destrutivos e não intrusivos, dando uma importância de relevo à técnica do georadar.

Estas potencialidades levaram a que, na última década, entidades ligadas à gestão rodoviária, essencialmente nos países mais desenvolvidos, tenham incorporado esta tecnologia nas práticas de engenharia de caracterização de pavimentos. Os maiores desafios que se colocam a esta tecnologia estão ao nível da precisão da localização de alvos abaixo das superfícies e na síntese da enorme quantidade de dados produzidos pelos sistemas de georadar, transformando-os em informação facilmente interpretável e utilizável pelos engenheiros rodoviários (Costa, 2009).

Como um modo alternativo de avaliação, qualitativa e quantitativa, aos métodos tradicionais utilizados hoje em dia, tanto para construção como para manutenção, tais como o método de extração de carotes e métodos de compactação utilizados para a estrutura e a espessura de pavimentos rodoviários, o georadar tem sido usado para obter dados contínuos relacionados com o estado das rodovias (Scullion & Saarenketo, 1997).

As grandes vantagens desta ferramenta incluem a possibilidade de efetuar inspeções a velocidades que não penalizam o nível de serviço prestado aos utentes das vias, a precisão na avaliação da espessura das camadas do pavimento, seja para efeitos de controlo de qualidade, garantia de qualidade, gestão de redes, ou de disponibilização de dados para retroanálise através de dados obtidos com o defletómetro de impacto, as possibilidades de utilização a nível da deteção de patologias de pavimentos, bem como a estimativa do índice de vazios das estruturas que constituem os pavimentos, a deteção de patologias nas camadas ligadas, como a desagregação por perda de ligação (“stripping”), o zonamento de contrastes hídricos das camadas granulares, a localização de armaduras em betão armado, a avaliação de fenómenos de escamação em tabuleiros de pontes e, ainda, a repetibilidade e rapidez.

Os sistemas georadar operam mais frequentemente através de emissão de energia por impulsos numa determinada frequência central, não obstante existirem já sistemas de frequência escalonada (“step-frequency”), embora ainda não vulgarizados mas já comercializados e que demonstraram reunir algumas vantagens em relação a outros mais clássicos.

Também a capacidade de operar com um conjunto de antenas em paralelo tem-se revelado vantajosa, nomeadamente nos domínios 3D.

A história do georadar na inspeção de infraestruturas de transporte tem pouco mais de duas décadas e neste período, a técnica desenvolveu-se a partir de uma técnica geofísica, por e para especialistas, para uma ferramenta de inspeção rotineira, utilizada sempre que se necessita de

informação detalhada sobre estradas, ruas, caminho-de-ferro, aeroportos, estruturas como pontes, ou terrenos de fundação e as suas propriedades.

Em Portugal, a utilização da tecnologia GPR ainda não é tão frequente, como já acontece em diversos outros países, quer na Europa quer nos Estados Unidos da América. Como exemplo, a América do Norte e os países Escandinavos são, desde a década de 80, palco de desenvolvimentos da aplicação do georadar a pavimentos, sendo que a estes se juntou o Reino Unido na década de 90. Dos estudos localizados, relacionados com inspeções de pontes e túneis, passou-se à inspeção de pavimentos.

No entanto, com o desenvolvimento tecnológico dos sistemas GPS e a sua instalação em viaturas, viria a permitir inspeções para efeitos de gestão de redes de estradas, envolvendo um significativo número de quilómetros, realizadas em períodos de tempo relativamente reduzidos. Nestes países, a utilização do georadar é rotina e encontra-se enquadrada por procedimentos normativos.

A utilização de métodos não destrutivos nos diferentes domínios da engenharia civil, pese embora não seja recente, tem sofrido um desenvolvimento crescente, sendo de prever que essa tendência se mantenha (Costa, 2009).

O potencial desta ferramenta reside no facto de envolverem meios relativamente ligeiros, de que decorrem custos menos significativos do que os associados a abordagens de investigação mais tradicionais e, ao mesmo tempo, menores implicações ao nível da utilização das estruturas sob inspeção, assim como no tipo de informação que estes métodos disponibilizam.

A capacidade de produzir informação a um ritmo, que só equipamentos eletrónicos com potentes processadores informáticos conseguem, possibilita melhores definições das imagens construídas com essa informação e maiores velocidades passíveis de serem praticadas durante a inspeção. Do mesmo modo, permite passar-se a conhecer a variabilidade dos parâmetros analisados em contínuo, em contraponto à tradicional amostragem casuística (Costa,2009).

A utilização do georadar, também designado por *Ground Penetrating Radar* (GPR), a nível da inspeção em contínuo de pavimentos rodoviários, está vulgarizada, inclusive legislada e obrigatória em certos casos, em diversos países, ao contrário de Portugal, onde isso ainda não

acontece, e a sua utilização restringe-se a utilizações em casos específicos e trabalho de investigação.

## **1.2. Objetivo do trabalho**

Este trabalho tem por objetivo analisar o desempenho do georadar, como ferramenta na determinação de fendilhamento em pavimentos, à superfície ou subterrâneo e também a detecção de água no interior dos pavimentos, sem ser necessário a utilização de técnicas destrutivas, morosas e caras. Para isso foram executados ensaios em laboratório e simulações numéricas.

## **1.3. Organização da dissertação**

O desenvolvimento deste trabalho está organizado em cinco capítulos, sendo o presente capítulo de Introdução em que se faz um enquadramento da utilização do georadar em pavimentos com um enquadramento histórico e tecem-se breves considerações sobre as motivações, os objetivos e o programa de investigação.

No segundo capítulo, apresenta-se a informação que foi obtida em documentos publicados, nos quais se procuraram conhecimentos, que permitissem evoluir para a realização deste trabalho propriamente dito. Apresentam-se aqui, aspetos relativos aos equipamentos e informação sobre o georadar.

No terceiro capítulo, expõe-se as opções tomadas relativamente ao equipamento utilizado, à decisão sobre os ensaios a ser efetuados em laboratório, assim como a interpretação dos resultados.

No quarto capítulo, expõe-se o trabalho realizado sobre a análise numérica com o *software* Reflex e o *software* Matlab para a comparação de resultados ensaiados em laboratório e os resultados simulados em Matlab.

Por último, no quinto capítulo apresentam-se as conclusões do trabalho e propostas de trabalhos posteriores.

## 2. UTILIZAÇÃO DO GEORADAR

### 2.1. Descrição do georadar

Os métodos convencionais existentes para a avaliação de pavimentos de uma estrada são métodos destrutivos, dispendiosos e morosos.

O georadar (GPR) é uma técnica não destrutiva baseada na propagação de radiação eletromagnética. Esta aplicação baseia-se no facto de a velocidade de propagação da energia eletromagnética e do modo como sofre reflexão nas interfaces entre diferentes materiais, serem afetados pelas propriedades elétricas e magnéticas dos materiais em que se propagam (Fernandes, 2006).

Os usos mais comuns do GPR em engenharia de pavimentos passam não só por medir a espessura da camada dos pavimentos, por identificar grandes espaços vazios ou detetar a presença de excesso de água numa estrutura, mas também localizar utilidades subterrâneas e investigar a delaminação significativa entre camadas do pavimento (Al-Qadi *et al.*, 2008).

O georadar tem um grande potencial para ser utilizado em pavimentos, com uma grande variação de aplicações:

- Detetar drenos existentes;
- Detetar humidade existente;
- Detetar redes pluviais ao longo da estrada;
- Estudar o peso específico das camadas;
- Medir as espessuras.

GPR é um radar desenvolvido para avaliar a falta de homogeneidade interna e espessuras das camadas, penetrando a superfície com ondas eletromagnéticas.

O princípio dos sistemas pulsados é que um impulso eletromagnético transmitido no solo é refletido a partir das interfaces de materiais que têm propriedades dielétricas distintas (Costa, 2009).

### 2.1.1. Tipos de antenas

Existem dois tipos de antenas com diferentes campos de aplicação: antenas com contacto na superfície (ground coupled antennas) e antenas suspensas (air coupled antennas), como se pode ver a Figura 1.



**Figura 1 - Exemplo de antena GPR de contacto com a superfície (em cima) e suspensa (em baixo)**

As primeiras com contacto com a superfície, como o nome sugere, são manobradas em contacto com a superfície ou ligeiramente acima desta. São antenas concebidas para obter resultados a maiores profundidades (chegam a alcançar 20 a 30 metros de profundidade), dado que operam a frequências baixas, entre os 16 MHz e os 1500 MHz. O facto de estarem em contacto com a superfície evita a dispersão do sinal no ar, melhorando a eficácia da emissão. Por outro lado, estas antenas evitam grande parte das interferências, pelo que

proporcionam uma melhor resolução vertical, em comparação com as antenas suspensas (para a mesma frequência). Porém, verifica-se nestas antenas o fenómeno de *ringing* (oscilação indesejada do sinal na camada mais superficial), pelo que a qualidade da informação nesta zona é fraca. Principalmente para evitar danificar a antena, a velocidade de operação é muito baixa. Nos casos em que o equipamento está um pouco suspenso, conseguem-se velocidades ligeiramente superiores, mas nunca acima dos 30 km/h.

As antenas suspensas são equipamentos mais recentes. Geralmente são posicionadas entre 0,3 e 0,5 metros em relação à superfície, de forma a evitar o choque com obstáculos, e possibilitando maiores velocidades de ensaio, permitindo velocidades na ordem dos 120 km/h. Geralmente têm frequências entre os 500 MHz e os 2,5 GHz, o que limita consideravelmente a profundidade de penetração, entre os 0,5 e os 0,9 m, mas permite resoluções de maior qualidade. Dadas as suas características, as antenas suspensas são mais indicadas para investigação de camadas mais superficiais e para ensaios que se pretendam rápidos.

### **2.1.2. Frequências das antenas**

As antenas de georadar são caracterizadas pela sua frequência. Correntemente dispõe-se de uma grande variedade de frequências, desde as baixas frequências de 10 MHz até às frequências da ordem dos 2 GHz e mesmo superior.

A escolha de uma determinada frequência está dependente do tipo de aplicação, profundidade e dimensões dos objetos, assim como do meio em que estes se inserem.

Contrariamente às antenas mais comuns que operam em contacto com o terreno (as antenas acopladas ao chão), as antenas suspensas (tipo “horn”) têm uma configuração específica que lhes permite serem utilizadas acima da superfície do terreno, com uma capacidade de penetração razoável. Isto deve-se ao facto do sinal emitido pelo transmissor e recebido pelo recetor, ter um percurso em forma de “V”. Este tipo de antenas tem algumas vantagens sobre as antenas acopladas ao terreno, pois permitem a inspeção a velocidades elevadas, sendo que lhes é permitido obter uma reflexão clara da superfície do pavimento e, por último, é possível fazê-lo sem recurso à extração de carotes (GSSI, 2007 b).

As antenas têm a função de irradiar o meio a investigar com energia eletromagnética e de receber a energia refletida nas interfaces entre materiais de propriedades dielétricas diferentes durante a sua propagação através do material sob investigação. As antenas típicas são constituídas por transdutores, ou elementos em forma de laço ou borboleta, que convertem a corrente elétrica nos elementos metálicos da antena em energia eletromagnética que é irradiada na direção do terreno sob a forma de um pulsar eletromagnético. Inversamente, estas antenas também convertem o pulsar eletromagnético em corrente elétrica, o que constitui o sinal output da energia eletromagnética refletida pelo terreno.

Atualmente começam já a ser utilizadas antenas tipo frequência escalonada (da expressão inglesa “stepped frequency”) que permitem, com uma só antena, varrer uma gama de frequências, até agora só possível recorrendo a diversas antenas. Outra opção inovadora são os conjuntos de antenas em paralelo, por vezes também permitindo combinações de diferentes frequências centrais, que possibilitam recolher dados, não segundo uma linha mas segundo uma faixa, ou seja, não reconhecendo um perfil bidimensional que é a extensão percorrida pela profundidade, mas sim um modelo tridimensional, ou seja, a largura do conjunto pela extensão percorrida pela profundidade (Costa,2009).

### **2.1.3. Sistema Radar**

Um sistema radar típico atual integra quatro componentes: unidade de controlo, antena(s) radar, unidade de visualização e dispositivo de armazenamento de dados, como se pode ver na Figura 2.

A unidade de controlo de um sistema radar é um dispositivo eletrónico composto por um microprocessador, memória para armazenamento da configuração, definições de cálculo e, eventualmente, de dados de campo. A unidade de controlo é uma componente de frequência independente, cujo propósito é gerar sinais eletromagnéticos de curto período e elevada voltagem, e transmiti-los à antena de transmissão, a qual, por sua vez, é responsável pela emissão da radiação sobre a superfície a investigar (Fernandes, 2006). Esta onda eletromagnética é então refletida por cada interface, entre materiais dielétricos adjacentes encontrados durante a propagação no meio sob investigação, e os ecos refletidos são

registados pela antena recetora. Finalmente, os dados são armazenados na memória, onde se processa a amostragem, filtragem e reconstrução, sendo então apresentada num monitor.

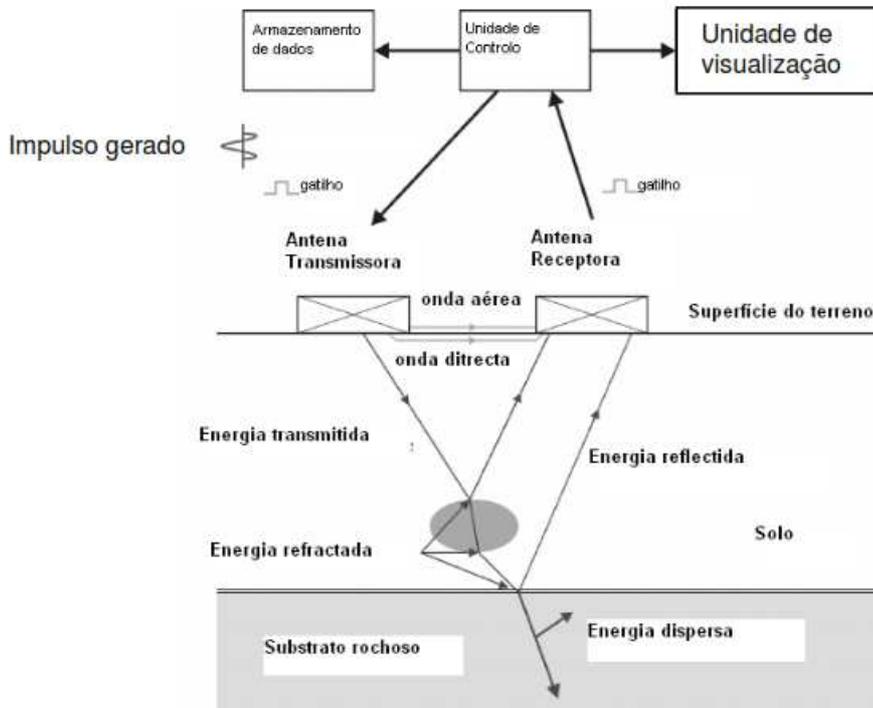


Figura 2 - Descrição dos componentes de um sistema GPR acoplado ao terreno (Fernandes, 2006)

## 2.2. Procedimento de análise

Os sistemas georadar são bastante flexíveis e permitem o registo de dados de diversas formas, dependendo do tipo de informação que o utilizador final pretende, da natureza do meio sob investigação e do equipamento em utilização. Pode considerar-se que atualmente existem três metodologias associadas ao georadar: modo de reflexão, “*commom mid point*” e modo de transmissão directa ou “*tomografia*”. Cada um destes modos tem as suas particularidades e difere significativamente no tipo de equipamento utilizado. Do mesmo modo, os resultados obtidos são substancialmente diferentes, sendo o “modo de reflexão” mais frequente, assim como o mais simples e mais rápido a nível da aquisição de dados com um sistema georadar (Costa, 2009).

Os equipamentos georadar que recorrem ao modo de reflexão utilizam, habitualmente, uma ou duas antenas que são deslocadas sobre o meio em investigação ao longo de uma determinada direção, mantendo constante a distância entre emissor e recetor. Geralmente, o emissor e recetor estão localizados num invólucro comum de material plástico (que também funciona como escudo à radiação exterior), designadas por antenas monoestáticas, o que permite que a distância entre ambos seja constante. A sequência inicia-se pela geração de um impulso eletromagnético pela unidade de controlo, o qual é enviado para a antena de transmissão que irradia o meio sob investigação com um feixe de energia eletromagnética. Esta onda eletromagnética é então refletida por cada interface entre materiais dielétricos adjacentes encontrados durante a propagação no meio sob investigação e os ecos refletidos são registados pela antena recetora. Finalmente, os dados são armazenados na memória, onde se processa a amostragem, filtragem e reconstrução, sendo então apresentada num monitor (Costa, 2009).

Geralmente, a unidade de controlo gera diversos milhares de pulsares por cada unidade de tempo, o que resulta numa taxa de repetição de diversos kHz que são enviados para a antena de transmissão (Fernandes, 2006). Um valor habitual para essa taxa de repetição pode ser de 50 kHz, mas equipamentos modernos atingem vulgarmente 100 kHz (como é o caso do equipamento Mala, que é uma antena de georadar), e, no caso de equipamentos com maior capacidade para utilização, a velocidades compatíveis com autoestrada, atingem 400 kHz ou mesmo 500 kHz (GSSI, 2006d).

O sistema regista o tempo de percurso da onda rádio desde a transmissão até ao local em que se dá a reflexão e do percurso subsequente até ao recetor, como podemos observar na Figura 3, geralmente designado tempo de percurso de ida-e-volta (“two-way travel time”) e expresso em nanosegundos (ns).

Em cada posição, o sistema mostra um ciclo completo da onda, através de um conjunto de diversas amostras obtidas durante um certo intervalo de tempo, em ns. Os registos são apresentados de uma forma contínua e dispostos no monitor sob a forma de um gráfico, que representa a imagem bidimensional da variação da amplitude do sinal eletromagnético que está fortemente dependente nas propriedades dielétricas dos materiais localizados sob o alinhamento do perfil percorrido.

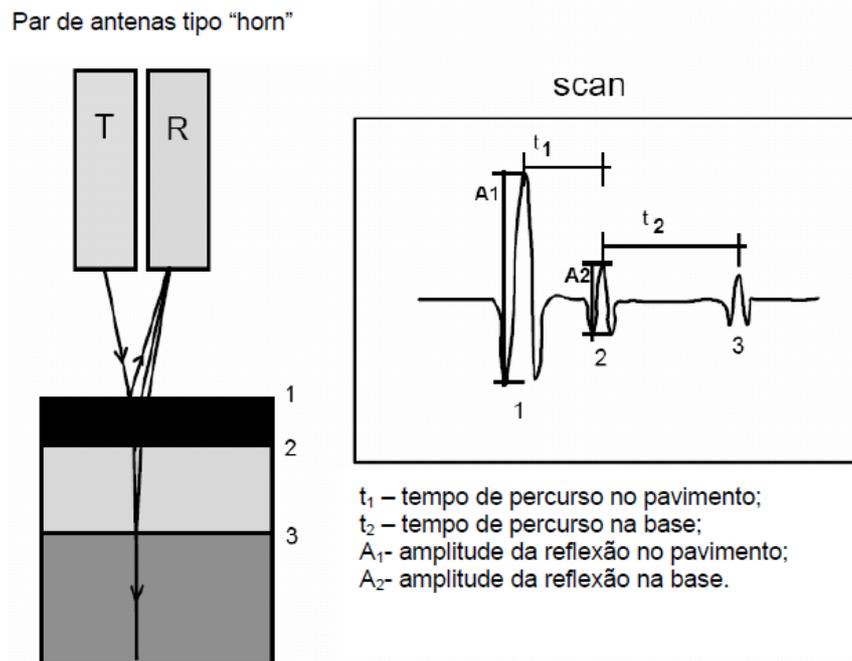


Figura 3 - Exemplo da leitura de um pavimento com uma antena tipo "horn" (Saarenketo, 2006)

A repetição desta sequência, acompanhada de deslocação da antena, vai originar um conjunto, cujas características vão depender, em grande parte, da frequência de emissão do sinal e da velocidade praticada (Costa, 2009).

Como se pode observar na Figura 4, o registo dos radargramas pode ser disponibilizado de acordo com uma escala de tonalidades acinzentadas, ou um menu de cores com as reflexões mais fortes destacando-se através das cores mais brilhantes.

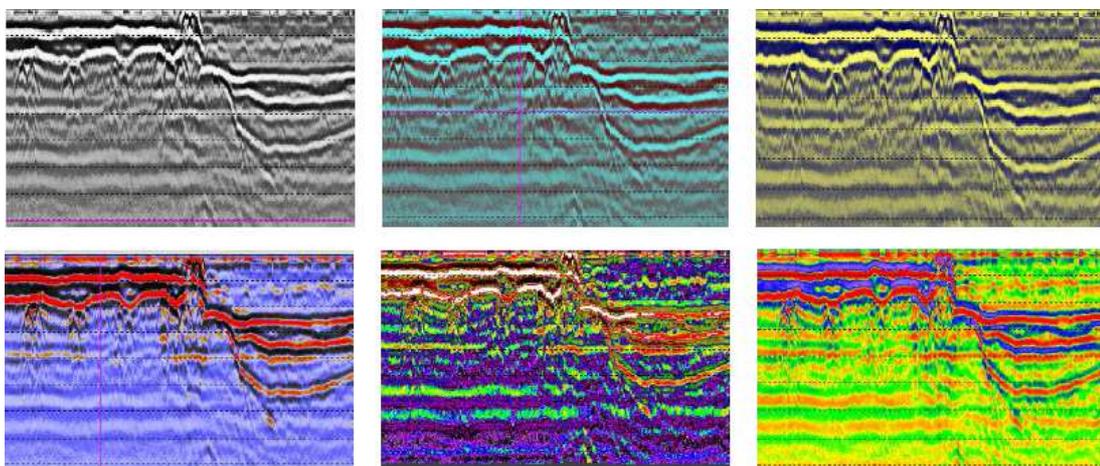


Figura 4 - Exemplo de um radargrama em várias escalas cromáticas (Costa, 2009)

Mantendo-se os conceitos já referidos anteriormente, apresentam-se aqui alguns aspetos específicos dos pavimentos. Três aspetos principais devem ser resolvidos para ser possível avaliar a espessura de pavimentos com o georadar (Hugenschmidt, 2003 *in* Costa, 2009):

- A velocidade do sinal durante a sua propagação nos materiais do pavimento deve ser definida;
- As reflexões relevantes nos dados do georadar devem estar identificadas e relacionadas com estruturas físicas;
- É necessário o contraste nas propriedades dos materiais entre diferentes camadas do pavimento para que seja possível estimar a sua espessura.

O registo gráfico do sinal refletido, evidenciando a amplitude da onda em função do tempo, é gerado no período entre a transmissão e a receção. Quando as medições são repetidas a uma cadência superior a 1000 impulsos por segundo, simultaneamente com o deslocamento da antena, dependendo sempre do equipamento e das características das medições, obtém-se um perfil contínuo ao longo do alvo (Costa, 2009).

As propriedades elétricas de que depende a propagação e reflexão do sinal de radar são: a suscetibilidade magnética, a permitividade dielétrica relativa e condutividade elétrica. A condutividade elétrica do meio contribui para atenuar o sinal eletromagnético georadar e, em determinada medida, a sua reflexão. A permitividade dielétrica é a propriedade elétrica que mais afeta o funcionamento do georadar, através da sua implicação ao nível da velocidade do sinal elétrico, a qual é necessário conhecer para estimar a profundidade a que se encontra o alvo. A permitividade dielétrica é um número complexo em função da frequência (Costa, 2009).

Um dos princípios básicos de funcionamento do georadar é de que se conhecendo o tempo,  $t$ , e a velocidade de propagação,  $v$ , do pulso, é possível determinar a distância  $d$  em que um determinado objeto está da fonte emissora do pulso.

$$d = v \times t / 2$$

Quando um impulso do georadar incide sobre uma interface que separa meios que possuem propriedades electromagnéticas diferentes, ou seja, onde existe uma descontinuidade elétrica (uma interface onde existe uma mudança na impedância electromagnética da onda), o campo

magnético é refletido parcialmente. A magnitude e a característica da onda elétrica refletida são controlados pela geometria e pelo contraste das propriedades elétricas dos materiais existentes. As variações da velocidade, atenuação do sinal e energia refletida nas interfaces estão diretamente ligadas às alterações no teor de humidade do material.

Quando a interface está entre duas camadas betuminosas, a similaridade entre as constantes dielétricas dos materiais tornam a deteção desta interface mais complexa, por causa das suas similaridades na constante dielétrica. No entanto, se a camada de desgaste está sobre um solo ou material grunular de base, as constantes dielétricas são bastante diferentes, facilitando a deteção da interface.

Um fenómeno importante na propagação das ondas eletromagnéticas é a condutividade elétrica do meio. A influência mútua do campo eletromagnético com meios que apresentam condutividade elevada leva à perda de energia por atenuação, a qual aumenta intensamente para valores de frequência muito elevados.

Além de depender da frequência e outros fatores, a atenuação aumenta rapidamente para frequências maiores devido ao efeito de relaxação da molécula de água, que ocorre nas proximidades da frequência de 10 GHz. Portanto, quanto maior for a condutividade elétrica do meio, maior será a atenuação do pulso. Isto determina a limitações do georadar em meios condutivos, pois nesses meios, uma onda eletromagnética sofreria uma atenuação e praticamente não se propagaria (Faria, 2010).

O georadar é uma técnica reconhecida e confiável, mas muita pesquisa ainda é realizada para aumentar a sua eficácia em aplicações novas e complexas, e no desenvolvimento de aplicações de *software* mais poderoso e eficaz que processam mais fácil e eficientemente os dados obtidos a partir de aquisições de campo.

A estimativa precisa de valores das constantes dielétricas ou da velocidade de propagação do sinal emitido é fundamental no processamento de dados de GPR. Um operador, analisando dados de infraestrutura de tráfego, precisa de informações sobre as propriedades dielétricas de solos, para calcular a espessura correta da camada, calcular o teor de humidade, calcular o índice de vazios, avaliar a humidade e sensibilidade que estão diretamente relacionadas a uma deformação permanente de materiais não ligados, estimar a compressibilidade dos solos e estimar a homogeneidade e a fadiga das camadas betuminosas.

O método tradicional para determinar o valor dielétrico do pavimento é calcular o valor usando carotes de referência. Este método ainda é o mais comum, especialmente quando se utiliza sistemas acoplados à terra. Um outro método, que é muito popular, é o método de reflexão da superfície (Scullion, 1991), o qual pode ser usado com sistema de antena acoplada ao ar. Neste “método de reflexão”, a amplitude da superfície do pavimento é comparada com a reflexão obtida com uma placa de metal refletora que representa uma reflexão total. Ao calcular as amplitudes, é possível calcular as constantes dielétricas das camadas. A equação (1) apresenta o algoritmo para o cálculo do valor da constante dielétrica à superfície e a equação (2) apresenta o algoritmo para o cálculo do valor da constante dielétrica para a segunda camada (Saaraenketo, 2006).

$$\epsilon_a = \left( \frac{1 + \frac{A_1}{A_m}}{1 - \frac{A_1}{A_m}} \right) \quad (1)$$

Onde

$\epsilon_a$ - o valor dielétrico da camada do pavimento

$A_1$  - a amplitude da reflexão a partir da superfície

$A_m$  - a amplitude do reflexo de uma grande placa de metal (100% de reflexão)

$$\sqrt{\epsilon_b} = \sqrt{\epsilon_a} \left[ \frac{1 - \left(\frac{A_1}{A_m}\right)^2 + \left(\frac{A_2}{A_m}\right)}{1 - \left(\frac{A_1}{A_m}\right) - \left(\frac{A_2}{A_m}\right)} \right] \quad (2)$$

Onde

$\epsilon_b$  = o valor dielétrico da camada 2

$A_2$  = a amplitude da reflexão do topo da camada

Estas equações provaram funcionar bem para estimar valores dielétricos para a camada de desgaste em pavimentos homogêneos. A equação (2) assume que não há uma atenuação do sinal do GPR na camada de desgaste. Esta hipótese parece ser razoável para os pavimentos e também fornece valores dielétricos razoáveis para a camada de base, isto se a camada é mais espessa do que 60 mm e não há camadas finas com diferentes propriedades dielétricas na parte inferior.

Para melhorar este método, no futuro, a atenuação de sinal tem que ser incorporada no processo de cálculo. Para pavimentos novos ou sem defeitos, a constante dielétrica, juntamente com a espessura da superfície, pode ser calculada facilmente. O fator que gera mais impactos na superfície é a densidade da camada e o fator que gera mais impacto na base é o teor de humidade da base. As reflexões do GPR também podem ser utilizadas para avaliarem a homogeneidade das camadas do pavimento.

Outro método utilizado para estimar os valores dielétricos de estruturas rodoviárias é o método, CMP, “Common Mid Point” (Al-Qadi et al, 2002). De acordo com Fauchard et al. (2003), este método fornece precisão suficiente dos valores das constantes dielétricas para as duas ou três primeiras camadas em estruturas rodoviárias (Saarenketo, 2006).

### **2.3. Aplicação do GPR em infraestruturas de transporte**

As primeiras abordagens deste método de investigação da subsuperfície, aplicados a infraestruturas de transportes, terão ocorrido na primeira metade da década de 70, tendo a *Federal Highway Administration* (FHWA) dos Estados Unidos da América (EUA), ensaiado a viabilidade da sua utilização no estudo de estruturas de túneis e de tabuleiros de pontes.

O princípio do GPR foi descoberto por Heinrich Hertz na década de 1880 e surgiu como uma alternativa inovadora e promissora para a utilização em rodovias (Faria, 2010). Ainda durante os anos 80, fizeram-se as primeiras investigações no âmbito da avaliação do teor em água de materiais de construção e ainda ao nível da deteção de vazios sob os pavimentos de autoestradas em betão.

Na Finlândia, nos anos 90, a utilização do georadar no contexto de pavimentos rodoviários, primeiro a nível do projeto de construção e de beneficiação e, posteriormente, a nível do controlo da qualidade, era já uma prática corrente.

Atualmente, este método generalizou-se a vários outros domínios que vão desde os de vias não pavimentadas ou de importância secundária, ao caminho-de-ferro (Saarenketo, 2006).

Também nos E.U.A., as décadas de 80 e 90 foram vantajosas para a diversificação de aplicações do georadar, assistindo-se ao desenvolvimento de metodologias para medição de espessuras de camadas de pavimento, recorrendo a antenas aéreas de 1,0 GHz de frequência acopladas a viaturas ligeiras (Saarenketo, 2006), que constituem um dos principais sucessos do georadar. No Reino Unido, as aplicações georadar, associadas às vias rodoviárias, datam de meados da década de 80, tendo-se centrado na utilização em estruturas de betão, avaliação de pavimentos, e, mais recentemente, de caminho-de-ferro. Saarenketo (2006) avalia em mais de 20 os países em que esta tecnologia já foi introduzida.

Em Portugal a experiência do LNEC neste domínio é importante, e a referência mais antiga localizada no âmbito deste trabalho foi a de Rodrigues (1991) e Rodrigues et al. (1991).

As estradas integram diversos tipos de estruturas que não o pavimento e igualmente suscetíveis de serem inspecionadas com georadar, como sejam pontes, túneis e estruturas de suporte.

A aplicação do georadar em pontes não se esgota na investigação dos tabuleiros, incluindo a inspeção de condições de fundação, de pilares e lajes de transição. Ao nível do tabuleiro podem ser objeto da inspeção com georadar (Saarenketo 2006): espessura de camadas do pavimento; patologias do pavimento; recobrimento de betão das armaduras; espaçamento da armadura; posicionamento de cabos de pré-esforço; patologias no betão; propriedades do betão e do pavimento.

No caso dos túneis, os objetivos de campanhas de georadar têm-se situado a nível da deteção de zonas de fratura (Davis e Annan, 1992) e da medição da espessura das paredes de betão, localização de armadura e deteção de vazios entre o betão e a rocha, deteção de zonas de percolação e outro tipo de patologias (Saarenketo, 2006).

Atualmente, o GPR é utilizado para avaliar a integridade das estruturas de engenharia civil e recuperar informações a partir de elementos estruturais, que não são possíveis de obter, sem a utilização de metodologias destrutivas, incluindo: a integridade estrutural de estruturas de betão, a deteção de varões de armadura de aço e vazios (Taffe et al, 2003; Maierhofer, 2003a), a delaminação da cobertura de betão (Maierhofer, 2003b; Derobert, 2003), a avaliação das

condutas em pontes (Taffe et al, 2003), a avaliação do pavimento e avaliação da espessura da camada de estrada (Al-Qadi e Lahouar, 2005).

Também foram feitos ensaios não-destrutivos, em laboratório, para a determinação do teor de humidade e nível da água durante o processo de cura do betume, sendo que a avaliação do conteúdo e distribuição de humidade tem sido apontada por Maierhofer (1998c) e Weise (2003).

O GPR também pode ser utilizado na avaliação do sal e propriedades dielétricas em tijolos, alvenaria (Maierhofer et al.,2001), no betão (Stousos, 2001) e materiais betuminosos (Al-Qadi et al., 2001), ou na verificação de ferrovias (Clark et al., 2004).

Outro campo de aplicação é a monitorização estrutural (Huston et al., 2000). O GPR foi usado para investigar as características das camadas de material sob os pavimentos (De Hugneschmidt e Whitte, 1998) e ainda para encontrar vestígios arqueológicos (Goodman e Nishimura 1992).

Todavia, a utilização do georadar em pavimentos tem tido muito sucesso devido às suas características e à sua capacidade para estimar a espessura das diferentes camadas do pavimento, permitindo eliminar estas incógnitas a nível da retro-análise no dimensionamento de pavimentos. No entanto, não se pode deixar de destacar que há evidências de que exista uma relação entre a constante dielétrica dos solos e a sua resistência mecânica, o que não pode deixar de parecer natural. Se a resistência de um solo está dependente da atração inter-partículas, deverá esperar-se que esta esteja relacionada com a sua constante dielétrica (Mitchell,1993). Apresentam-se alguns exemplos de onde o GPR é utilizado no estudo de pavimentos (Costa, 2009):

- Gestão de redes de estradas – espessuras, secções estruturais e estruturas especiais;
- Projeto de estradas - investigação de locais, espessura de estruturas, parâmetros de dimensionamento e explicação de patologias;
- Controlo de qualidade e garantia de qualidade – espessuras, localização e índice de vazios;
- Espessura, suscetibilidade à água e transição de estruturas;

- Monitorização do estado do pavimento - presença de água, indicadores de patologias.

### 2.3.1. Densidade

Nos pavimentos, o índice de vazios e a densidade são dos fatores mais importantes que afetam a vida e as propriedades de deformação dos pavimentos. Embora tenham existido várias tentativas para estimar os vazios ou a densidade de pavimento betuminoso utilizando GPR, esta aplicação está ainda na sua fase de desenvolvimento e, conseqüentemente, a literatura relevante é limitada (Costa, 2009).

A primeira tentativa de usar a medição GPR para prever a propriedade volumétrica de massa betuminosa foi feita por Al-Qadi (1992), que desenvolveu modelos de regressão para prever o teor de humidade volumétrica da mistura de betume com base na sua constante dielétrica. Embora o foco deste estudo tenha sido o de estimar a quantidade de humidade existente na mistura, o mesmo princípio pode ser aplicado para a previsão de teor de vazios.

Lytton (1995) criou um programa de computador para prever a densidade e o teor de água das diferentes camadas granulares dentro de um sistema de múltiplas camadas, usando um GPR convencional (Patente dos EUA No. 5.384.715). O *software* SIDARS aproveita o facto de cada camada do pavimento ser composta por três tipos de material: sólidos, líquidos e ar. Assim, a constante dielétrica de uma camada de pavimento é em função de um sólido, dos fluidos e do gás. Um modelo de propagação da onda do sistema de pavimentação é utilizado em SIDARS para gerar um sinal sintético de radar. Os valores iniciais para o sólido, o líquido e as concentrações de gás são ajustadas através do processo iterativo para minimizar o erro médio entre os sinais medidos e os calculados (Lyt Imad I. Al-Qadi, Zhen Leng, Al Larkin, 2011). Ao calibrar o modelo incorporado no *software* de dados obtidos a partir de carotes adquiridos no terreno, o volume e composições podem ser calculados (Imad I. Al-Qadi, Zhen Leng, Al Larkin, 2011).

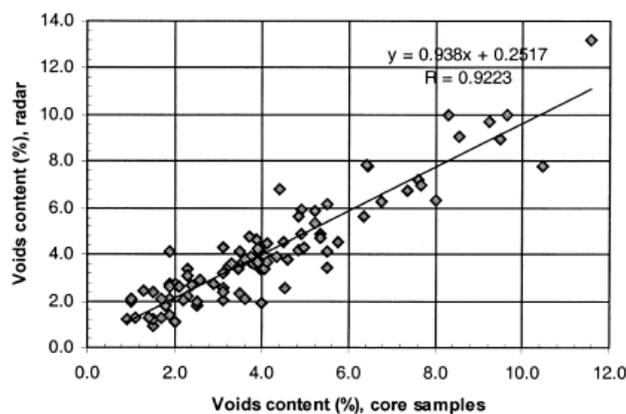
Saarenketo (1997) é um dos primeiros investigadores na Europa a usar GPR para medir a densidade do pavimento. O estudo também foi baseado no conceito de que a constante dielétrica de um pavimento pode ser assumida como sendo uma função das constantes

dielétricas dos seus componentes. Portanto, as alterações nas suas proporções podem ser medidas gravando as constantes dielétricas globais do pavimento. Os componentes das misturas betuminosas incluem agregado, ar e, possivelmente, água. Os exames laboratoriais foram concretizados para correlacionar a constante dielétrica e a densidade da mistura a seco. Com base na sua investigação, investigadores finlandeses concluíram que existe uma relação exponencial entre a superfície dielétrica e o conteúdo de vazios (Imad I. Al-Qadi, Zhen Leng, Al Larkin, 2011):

$$void(\%) = a' e^{-b' \epsilon_{AC}}$$

Onde  $\epsilon_{AC}$  representa a constante dielétrica da superfície, que pode ser obtido com antenas “horn”, e os coeficientes  $a$  e  $b$  são constantes dependentes do tipo de mistura.

Embora a relação entre o valor dielétrico e o teor em vazios se tenha considerado anteriormente como logarítmica, como se pode ver na figura seguinte, relativa a trabalho realizado no Texas (Scullion, Saarenketo, 2002) obtiveram-se correlações lineares muito boas como se pode verificar na Figura 5.



**Figura 5 - Correlação entre variações no valor da superfície dielétrica e variações na percentagem de vazios (Scullion, Saarenketo, 2002).**

Dados GPR recolhidos de várias estradas provaram que a queda no valor dielétrico indica problemas de densidade.

Mais claramente, o estudo demonstrou que o GPR oferece um enorme potencial para auxiliar no acompanhamento de problemas localizados (Scullion e Saarenketo 2000). Silvast (2001)

usou a tecnologia GPR para medir o índice de vazios no aeroporto Helsínquia -Vantaa, na Finlândia. O objetivo do projeto foi avaliar a eficácia da aplicação GPR para controle de qualidade do pavimento. Dados foram recolhidos numa área de pavimento de 900 m de comprimento e 60 m de largura, contendo oito pistas paralelas. A constante dielétrica do pavimento foi calculada usando a técnica de reflexão da superfície (Imad I. Al-Qadi, Zhen Leng, Al Larkin, 2011).

Foi realizada uma pesquisa no Texas, usando dois métodos de ensaios não destrutivos, raios infravermelhos e GPR, para avaliar a uniformidade da densidade de sobreposições de asfalto. Ao comparar os dois métodos de teste, a pesquisa concluiu que o GPR é uma ferramenta melhor para a investigação do que os dispositivos de infravermelhos para identificar se as mudanças de densidade na superfície são homogêneas (Imad I. Al-Qadi, Zhen Leng, Al Larkin, 2011).

### **2.3.2. Água nos solos**

De acordo com Saarenketo (2006), foi realizada uma investigação relativamente ao aparecimento de patologias nos pavimentos em função do período do ano. Concluiu-se que as variações sazonais do estado hídrico das plataformas rodoviárias, e, no caso de zonas com Inverno mais severo, os ciclos de gelo-degelo, são fatores com significativas implicações negativas nas redes de estradas.

O teor em água tem um grande efeito a nível das propriedades resistentes e de deformação dos pavimentos betuminosos e, inclusive, das camadas granulares e solo de fundação. Uma das maneiras de avaliar os teores em água é através do conhecimento das propriedades dielétricas dos materiais.

O teor em água afeta a tensão da água nos poros que se desenvolve nos solos. Os efeitos, quer das pressões positivas, quer das pressões negativas da tensão da água nos poros, têm um efeito predominante na resistência ao corte e variações de volume nos solos. A compreensão dos fenómenos de percolação tem sido utilizada para explicar as relações entre as propriedades termodinâmicas e as propriedades resistentes e de deformação dos materiais constituintes dos pavimentos (Saarenketo, 2006).

A técnica georadar tem sido utilizada para localizar secções de estrada com teores em água excessivos ao nível da sub base e ajudar os engenheiros de pavimentos a projetar drenagem adequada (Wimsatt *et al.*, 1998). Existem também alguns casos de utilização do georadar em campanhas de avaliação de estabilidade de aterros, especialmente a nível de taludes (Saarenketo, 2006).

### **2.3.3. Espessuras das camadas**

O georadar também pode ser utilizado para monitorizar assentamentos em estradas, comparando as variações da espessura do pavimento com informações anteriores da mesma estrada e também do nível da superfície da estrada (Saarenketo, 2006). No caso de intervenções a nível do perfil transversal, a melhor informação, relativa a variações da compressibilidade dos solos de fundação, pode ser obtida diretamente através da auscultação da estrada existente com georadar. Esta técnica é especialmente útil quando se pretende estimar a extensão dos assentamentos numa estrada nova e quando se projetam aterros sobre terrenos constituídos por argilas, silte ou turfas (Saarenketo, 2006).

Todos os materiais aplicados em estradas e leitos de pavimento podem ser descritos como materiais compósitos, em que os seus valores dielétricos são uma combinação de (Saarenketo, 2006): constantes dielétricas individuais dos componentes, frações volumétricas dos componentes, geometria dos componentes, e interações eletroquímicas entre os componentes.

Nos solos e agregados utilizados nas camadas não ligadas de pavimentos, estes componentes são normalmente: ar, água e/ou gelo, agregados e produtos resultantes da alteração destes, tais como argilas, materiais coloidais, sais e compostos orgânicos. Saarenketo (2006), cita Olhoeft e Capron (1994), referindo que os mecanismos de perda elétrica (“*electrical loss*”), que afetam o desempenho do sinal de georadar, incluem: perda térmica por condução, perda mecânica das moléculas da água por relaxação decorrente da orientação dessas moléculas, e perda eletroquímica associada a minerais de argila.

A permitividade dielétrica complexa é dependente da frequência e está condicionada por estes fenómenos. Em solos e agregados depende do modo como estão ligadas as moléculas de água

na superfície dos minerais (água adsorvida), de tal forma que a permitividade dielétrica de água que desenvolve ligações muito fortes à superfície dos minerais é próxima do valor dielétrico do gelo (Saarenketo 2006). A relação entre o teor em água e a permitividade dielétrica tem sido discutida por diversos autores. Saarenketo, 2006 considera que Ulaby *et al.* (1986) apresenta um ponto de situação detalhada sobre os diferentes modelos da água nos solos. Benedetto (2004) *in* Saarenketo, 2006, usou esses modelos para avaliar diferentes solos de fundação italianos e mostrou que para cada um desses modelos existem tipos de solos cuja previsão do seu teor em água não é possível e sugere que se utilizem modelos semi-empíricos para a previsão do teor em água, após calibração dos modelos.

Na Figura 6, retratada em baixo, os valores dielétricos medidos na superfície da base são inferiores onde a camada de base sobre a sub base com um elevado teor em água é mais espessa o que demonstra o efeito de subida por capilaridade. De acordo com as medições no mesmo local, os valores dielétricos da camada de base na mesma altura que a campanha georadar era de 7-8 e o valor dielétrico da sub base era de 16-18. A escala de profundidade dos dados georadar foi calculada utilizando um valor dielétrico de 6 (Saarenketo, 2006).

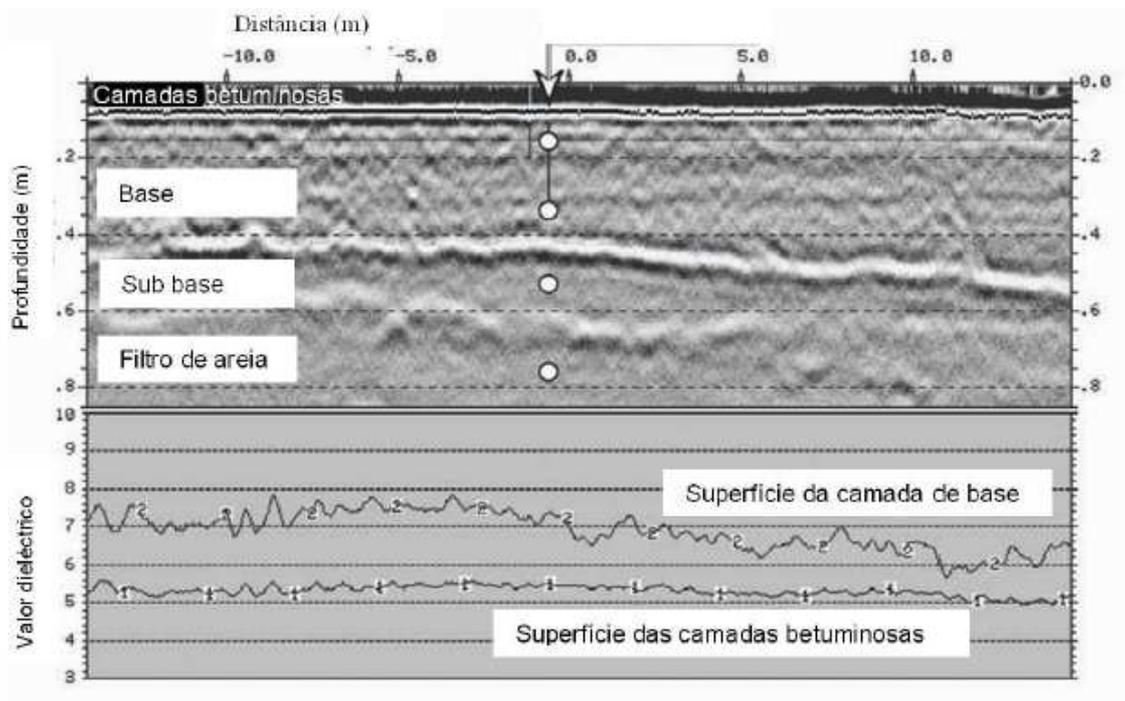


Figura 6 - Perfil obtido com uma antena aérea georadar 1,0 GHz. (Saarenketo, 2006)

Quando avaliamos o tipo de solo de fundação em projetos de estrada é fácil identificar os dados no georadar, nomeadamente os solos granulares grosseiros, areia e solos glaciares. O georadar também funciona bem na identificação dos solos orgânicos (Doolittle e Repertus, 1988). O sinal georadar tem uma penetração de sinal na maioria de solos siltosos mas os problemas começam quando estão em causa argilas.

Em muitos casos, o tipo de solo pode ser determinado a partir de dados do georadar, porque cada solo tem a sua própria estrutura geológica, constante dielétrica e condutividade elétrica (Benedetto e Benedetto, 2002). Estas propriedades produzem uma impressão digital da textura no perfil georadar. A avaliação do tipo de solo requer sempre dados de um grau de objetividade maior que confirmem a interpretação georadar. Uma excelente informação de suporte pode ser obtida com o defletómetro de impacto.

O posicionamento do substrato rochoso é um aspeto importante no estudo do comportamento de um pavimento. Se o substrato rochoso se encontrar próximo da superfície, a interpretação de dados georadar pode ser confirmada através da forma da deformada do defletómetro de impacto e algoritmos de retro análise do mesmo equipamento. Se as campanhas de georadar forem levadas a cabo no Inverno, as zonas em que o substrato rochoso se encontra mais próximo da superfície, ao nível do gelo, é fácil de identificar, porque no perfil georadar não existem reflexões da superfície de congelamento no substrato rochoso. O georadar permite ainda observar a estratificação da rocha e as zonas das maiores fraturas para efeitos de avaliação da estabilidade dos taludes (Saarenketo, 2006).

Quando se calcula a espessura das camadas do solo de fundação, deve ter-se presente que as propriedades dielétricas do solo correlacionam de forma bastante boa com o teor em água e o tipo de água no solo (Saarenketo, 2006). Nas camadas de solos, a dispersão dielétrica é significativa e os valores dielétricos diferentes poderão ser obtidos se as medições forem realizadas com antenas de 400 MHz e 1,5GHz (Costa, 2009).

Quando o sistema de pavimento é composto por camadas relativamente espessas, os impulsos do GPR refletidos terão uma pequena a inexistente sobreposição. Esta condição torna a deteção da interface com a camada de reflexão mais fácil do que no caso de camadas finas. A camada de pavimento pode ser considerada mais fina ou grossa, dependendo se a sua

espessura é menor ou maior do que a resolução de profundidade GPR (Al-Qadi e Lahouar 2005).

Quando as camadas de pavimentos são relativamente espessas, é garantido que as camadas detetadas por GPR sejam relativamente homogêneas, no sentido em que não são compostas de múltiplas camadas finas, reduzindo, assim, os erros de medição de espessura, causadas por variações da constante dielétrica dentro da camada. Para pavimentos rígidos, a condição de camadas de espessura é geralmente verificada, tanto para a laje de betão como para a camada de base de apoio. Em contraste, para pavimentos flexíveis, as camadas de HMA são geralmente compostas por pelo menos uma camada fina, que é a camada de desgaste ou qualquer reforço recentemente colocada. No entanto, no caso de pavimentos flexíveis recentemente construídos e não envelhecidos, as camadas de HMA poderiam ser consideradas como uma única camada de espessura relativamente homogênea, especialmente quando elas são compostas do mesmo tipo de agregado e betume.

As camadas finas são normalmente encontradas em serviço nos pavimentos flexíveis ou rígidos, onde as sobreposições foram adicionadas ao longo do tempo como parte de projetos de reabilitação. Como mencionado anteriormente, a existência de camadas finas, dentro de um sistema de pavimento, tem efeitos consideráveis sobre os resultados da espessura da camada relatados por GPR. Se estas camadas são ignoradas durante a fase de análise de dados de GPR, as constantes dielétricas estimadas pelas equações (1) a (2) seriam incorretas. Além disso, uma vez que a constante dielétrica de qualquer camada inferior depende das constantes dielétricas de todas as camadas acima dela, erros na estimativa das camadas de topo da constante dielétrica resultaria em constantes dielétricas erradas para todas as camadas abaixo. (AL-Qadi Lahouar 2005).

Em estruturas de pavimentos as camadas não ligadas, situam-se entre o solo de fundação e as camadas betuminosas. As camadas não ligadas são normalmente formadas com materiais granulares britados não suscetíveis ao gelo e insensíveis à água. Trata-se de camadas de importância essencial, das quais depende o suporte das camadas betuminosas. A precisão da medição de espessuras destas camadas com recurso ao georadar é da ordem de 8 a 12% (Al-Qadi *et al.*, 2002).

Os resultados laboratoriais e de campo mostraram que o valor dielétrico, que é uma medição de quão bem as moléculas de água se encontram arranjadas, em torno e entre as superfícies de agregados de minerais e de quanta água livre existe, pode ser um indicador bastante melhor da resistência e deformação destas camadas do que o seu teor em água. Cada tipo de agregado tem uma relação única entre as propriedades dielétricas e o teor em água. Além disso, valores dielétricos elevados da camada de base, estimados a partir dos dados georadar, são sempre bons indicadores da existência de potenciais problemas nas camadas (Saarenketo, 2006). Também valores dielétricos baixos em camadas não ligadas podem indicar potenciais problemas. Neste caso, a gradação do material da camada de base é muito aberta e sob compactação é suscetível de deformação permanente.

A medição da espessura da camada é de longe a aplicação mais comum e bem-sucedida de GPR na pesquisa de pavimentos. Os dados de espessura em estudos feitos anteriormente usando GPR são recolhidos para fins de:

- Projeto de reforço e previsão de vida útil do pavimento,
- Apoio de outras técnicas de teste, tais como testes FWD, e
- Quando novos sistemas de pavimento são construídos, as camadas mais antigas são sobrepostas.

A capacidade de GPR para medir pavimentos e base de espessura tem sido amplamente documentada, embora diferentes investigadores relatem vários resultados GPR, dependendo do local levantado e da técnica de análise de dados GPR utilizada.

As figuras 7 e 8 mostram radargramas de um estudo feito a medição de espessuras de pavimentos feito por Edwards and Mason. 2011, com o *software* RADAN para as antenas de 900 MHz e 1.5GHz.

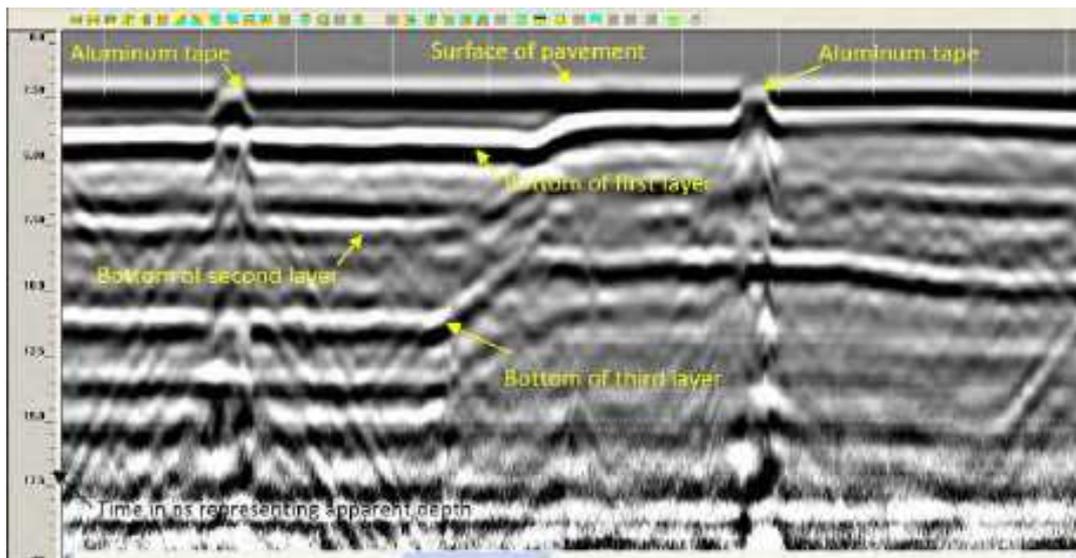


Figura 7 - Radargrama das espessuras das camadas de um pavimento com uma antena de 900 MHz (Edwards, Mason, 2011).

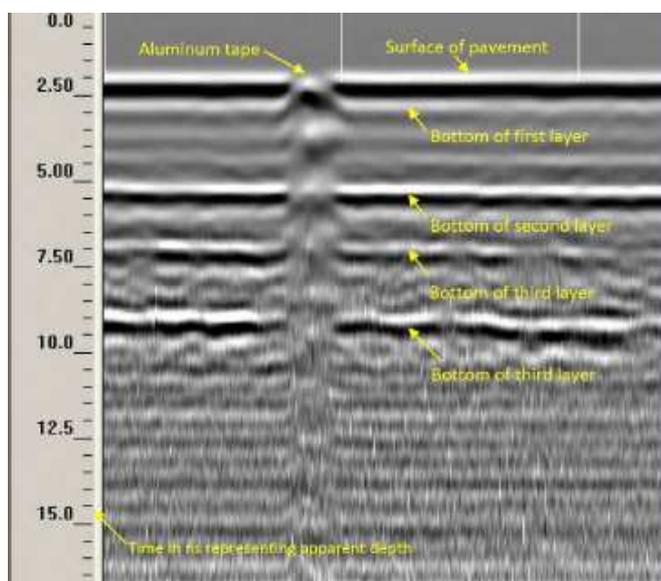


Figura 8 - Radargrama das espessuras das camadas de um pavimento com uma antena de 1.5 GHz (Edwards, Mason, 2011)

Para um pavimento antigo, Lahouar et al. (2002) relatou um erro médio de 6,8% na estimativa da espessura das camadas do pavimento de betume que vão de 280-350 mm de espessura, enquanto um erro médio de 3,8% para uma de camada de espessura de 100mm a 200mm foi relatado por um novo sistema de pavimento na *Virginia Intelligent Road*. Num outro estudo, Maser (1996) relatou variações na precisão da espessura de 7,5% para camadas com espessura entre 51 e 500mm e de 12% para as camadas de base granular com espessuras variando entre 150 a 330mm.

Loizos e Plati (2007) relataram um erro médio de entre 5% e 10%, dependendo da técnica de estimação da constante dielétrica utilizada. Al-Qadi et al. (2001) realizou levantamentos numa secção de teste da Rota 288 em *Richmond*, Virgínia, para avaliar o desempenho do GPR, quando foi usado como uma ferramenta QA-QC (*quality assurance - quality control*) para um pavimento recém-construído. Os dados GPR foram recolhidos sobre a camada de base granular e as três camadas diferentes na secção de teste do pavimento. As medidas foram realizadas cerca de cinco horas após as misturas. Uma comparação entre as espessuras de GPR para as espessuras medidas diretamente a partir de amostras retidas no campo revelou um erro médio de 2,9%. Concluiu-se então no estudo que a alta precisão do GPR era devido à homogeneidade das camadas, uma vez que tinham sido recentemente construídas no momento do levantamento.

Deve notar-se que em todos os estudos acima mencionados, o método utilizado foi o sistema de GPR acoplado no ar, para calcular a constante dielétrica para a medição da espessura do pavimento (Al-Qadi e Lahouar, 2005a).

Al-Qadi et al. (2003) utilizou o método do ponto médio comum modificado com um sistema de GPR acoplado ao ar e um sistema de GPR acoplado ao chão para medir a constante dielétrica média de uma camada de pavimento. Esta técnica produziu um erro de espessura média de 6,8% para os dados de GPR recolhidos de uma parcela de 27km da I-81. Os investigadores concluíram que os erros foram principalmente atribuíveis à localização imprecisa da reflexão da superfície da antena acoplada ao chão. Para simplificar e acelerar a precisão de dados, vários programas foram desenvolvidos por investigadores para calcular automaticamente a espessura da camada de pavimento (Lahouar e Al-Qadi 2008).

#### **2.3.4. Espessura de pavimentos**

Os dados do georadar obtidos para a deteção da espessura dos pavimentos servem os seguintes propósitos: alimentação de informação de sistemas de gestão de pavimentos; complementar dados do defletómetro de impacto no cálculo do módulo das camadas; dimensionamento de pavimentos; e para controlo e garantia da qualidade.

Os trabalhos neste tipo de aplicação demonstram a precisão que este método pode assumir na avaliação da espessura dos pavimentos. Maser (1994) situou a precisão do georadar para avaliar espessuras de pavimentos com um erro entre 8%, quando não haja recurso a carotes e 5%, quando seja possível dispor desta informação. Posteriormente, o mesmo autor (Maser et al., 2003) situa a precisão da avaliação da espessura média do pavimento em 2,5mm, num trabalho em que testou tanto a técnica de antenas aéreas como de antenas acopladas ao terreno através da técnica “*Common Mid Point*” a nível da garantia de qualidade de pavimentos betuminosos novos.

Utilizando as técnicas já descritas em pavimentos novos, a precisão do georadar em termos de avaliação de espessuras pode situar-se entre 3-5%, sem carotes de validação (Saarenketo, 2006). O problema com pavimentos mais antigos, quando se recorre a técnicas de reflexão, é que a superfície de valores dielétricos é estimada a partir da superfície e isto pode, algumas vezes, levar a sobrestimar a espessura do pavimento. Assim, para pavimentos mais antigos recomenda-se realizar carotagem, obtendo-se uma precisão entre 5 a 10%. As camadas mais finas podem também ser detetadas com antenas de 2,2GHz até espessuras da ordem dos 20mm (Saarenketo, 2006).

Com estes dispositivos, as variações de velocidade do sinal são muito pequenas (3-5%) correspondendo a 2-3 amostras num scan (Saarenketo, 2006).

### **2.3.5. Detecção de Patologias nos pavimentos**

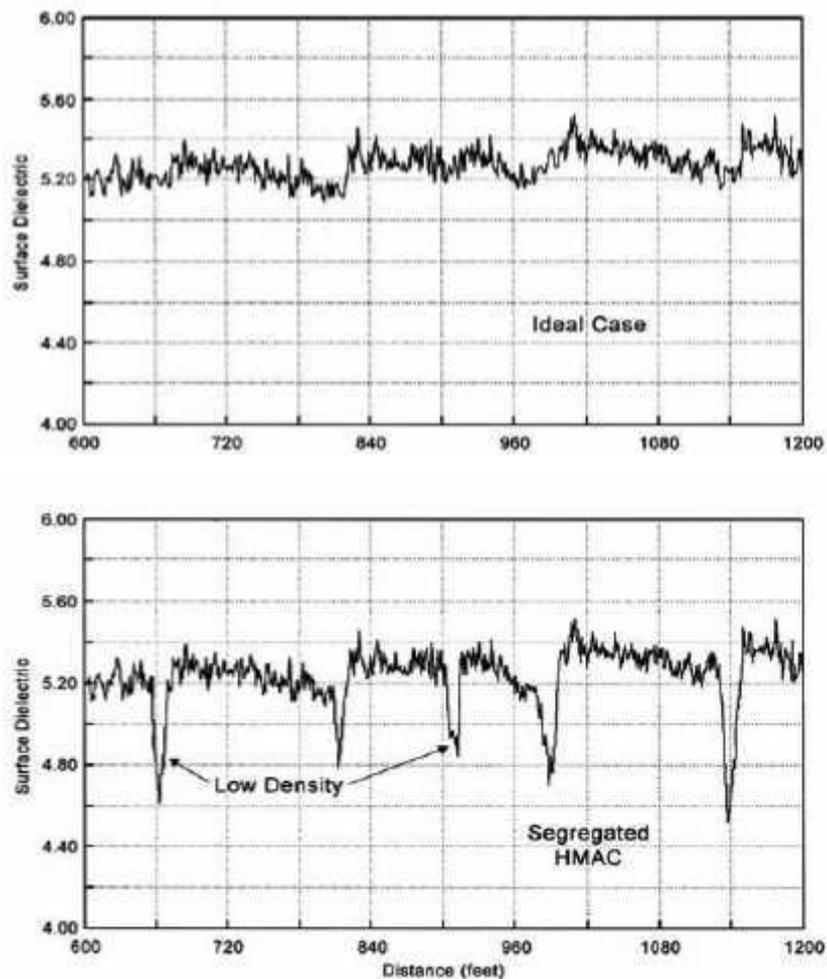
Além de medição de espessuras dos pavimentos, uma outra aplicação comum do GPR para pavimentos é a detecção de patologias. As patologias potencialmente identificáveis por GPR incluem principalmente a segregação, a detecção de vazios, humidade e a delaminação da interface de pavimento e fendilhamento do pavimento (Sebesta e Scullion, 2002a, 2002b).

A segregação manifesta-se como pequenas áreas de material de baixa densidade na camada de revestimento (Saarenketo e Scullion, 2000). Após a inspeção destas pequenas áreas, um excesso de agregados graúdos é encontrado. As causas são, muitas vezes, atribuídas a técnicas de manipulação ou de construção desapropriadas. Se uma superfície é uniformemente compactada, a superfície dielétrica deve ser constante, no entanto, se uma área de alta

permeabilidade tem excesso de vazios, este será observável na superfície dielétrica como uma diminuição do valor dielétrico medido (Sebesta e Scullion, 2002a, 2002b), como se pode observar na Figura 9.

Os danos mais comuns no interior dos pavimentos é a decapagem, que é um mecanismo relacionado com a humidade onde a ligação entre o betuminoso e o agregado é quebrado, deixando uma camada instável de baixa densidade no pavimento, ou seja, é uma patologia induzida pela humidade que ocorre quando a ligação entre o betume e o agregado é quebrado pela água penetrante, deixando uma camada de baixa densidade instável no pavimento. As camadas decapadas devem sempre ser detetadas e removidas antes de se optar por fazer uma sobreposição. O GPR tem sido várias vezes utilizado para detetar decapagem (Cardimona et al, 2003.).

A *Texas Transportation Institute* realizou várias pesquisas para identificar a presença de decapagem (Saarenketo e Scullion 1994). Estes estudos indicaram que a existência de decapagem grave na camada superficial causaria um pico adicional entre as superfícies de base e reflexões da antena. Deve notar-se que o GPR funciona somente se houver diferenças significativas nas propriedades elétricas entre as camadas. Portanto, quando os problemas de decapagem estão nos seus estados iniciais e, portanto, ainda não produziram alterações nas propriedades elétricas, é muito difícil para o GPR detetá-los. Além disso, quando o pavimento é testado sob condições secas ou molhadas, os sinais característicos de decapagem serão diferentes. Quando a camada de separação é seca, um pico negativo será observado, devido à sua baixa densidade e, portanto, menor constante dielétrica. Quando a zona de separação é saturada, um pico positivo vai ser encontrado devido à constante dielétrica da água acumulada ser muito alta. Hammons et al. (2006) propuseram a utilização do índice de GPR uniforme, o que equivale à amplitude de GPR num local e com profundidade específica dividida pela amplitude média de GPR durante um intervalo de normalização, como um indicador de decapagem de pavimentos. Com base no índice, a pista foi segmentada em características que poderiam ser usadas para planear as operações de perfuração e testes sísmicos para verificar e confirmar ainda mais as áreas de decapagem (Al-Qadi 1996).



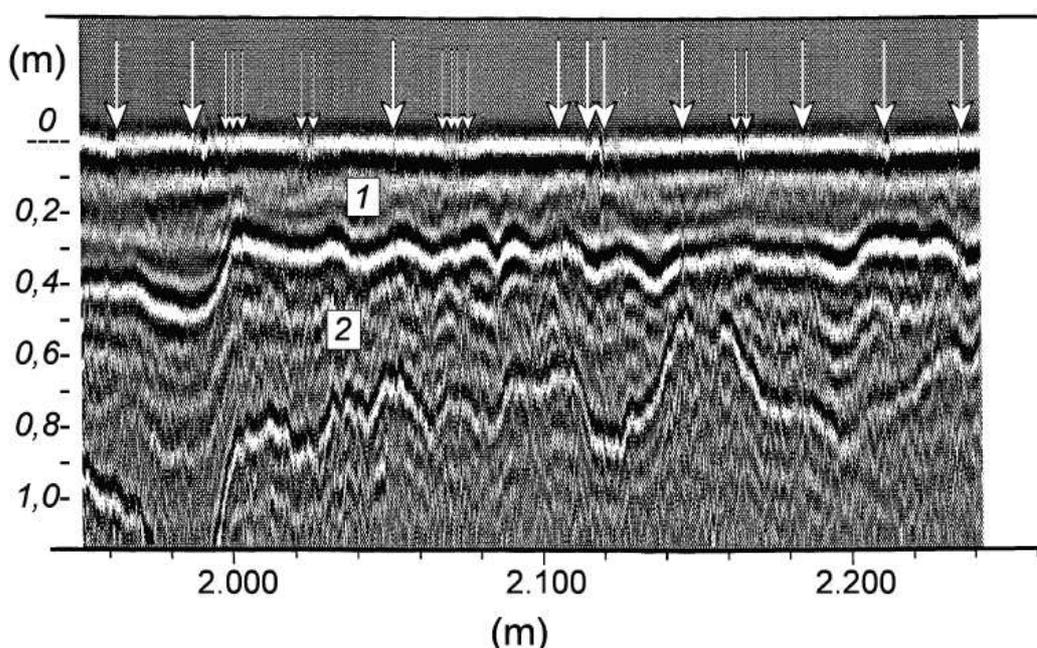
**Figura 9 - Detecção de segregação em mistura betuminosa a quente através do registo da variação da constante dielétrica avaliada com georadar (Sebesta e Scullion, 2002b in Saarenketo, 2006).**

Outra das principais causas de desgaste nos pavimentos é a humidade, sendo que esta acumula dentro das camadas, chamando-se assim barreiras de humidade. Isto acontece quando os tecidos impermeáveis são colocados entre as camadas, ou quando a superfície existente é moída e substituída com uma camada menos densa. Os sinais do GPR são altamente sensíveis às variações tanto da humidade como da densidade.

A delaminação, que é o “descolamento” das camadas, que ocorre quando a ligação entre camadas de betume separadas se descolam, que geralmente se desenvolve numa profundidade abaixo da superfície do pavimento, é o principal contribuinte para a ocorrência de fragmentação.

Em estudos realizados anteriormente (Joyce 1985), o sistema GPR foi usado como uma ferramenta para avaliar rapidamente as condições gerais de tabuleiros de pontes em relação a delaminações.

O GPR tem sido útil na detecção de fissuras transversais (Saarenketo e Scullion, 1994). No Reino Unido, Floresta e Utsi (2004) utilizaram um GPR para detectar a profundidade das fissuras de cima para baixo em pavimentos betuminosos. Na Figura 10 pode se ver um exemplo do georadar utilizado na sua detecção.



**Figura 10 - Exemplo de utilização de georadar na determinação das causas da fissuração transversal (Saarenketo, 2006).**

Outros estudos têm posto em causa a aplicação de GPR na detecção da delaminação entre as camadas do pavimento. Mesmo nas frequências de 1 a 2GHz, os comprimentos de onda de GPR em asfalto são muito longos para detetar o descolamento fino. A modelagem numérica dos sinais de GPR em caso de descolagem do pavimento foi realizada por Smith e Scullion (1993). Os resultados indicaram que uma delaminação cheia de ar de 5,0mm e descolagem preenchida com água de 2,5 m ou mais, a uma profundidade mínima de 50mm, podem ser detetados utilizando uma antena GPR de 2,5GHz. A velocidade máxima sugerida para aquisição de dados foi de 16 km/h. Com base noutras investigações de campo, a leitura com GPR pode fornecer informações úteis que podem indicar descolamento entre as camadas de asfalto. Com base na literatura disponível, a detecção de delaminação entre camadas,

especialmente na sua fase inicial de desenvolvimento exige uma investigação mais aprofundada sobre o assunto (Al-Qadi 1996).

A detecção de vazios nos pavimentos utilizando métodos não destrutivos é de grande interesse e importância para os engenheiros da área devido à perda de apoio nos pavimentos. Normalmente, os vazios são criados quando a água entra no pavimento e, juntamente com a ação do tráfego e lava as partículas mais finas. O primeiro projeto de investigação sobre a viabilidade da utilização de GPR para localizar e medir os vazios sob pavimentos foi em 1981 (Steinway 1981, *in* Al-Qadi 1996). Neste estudo foi utilizado a antena de 1GHz com um sistema tipo “*horn*”. Verificou-se que o GPR foi capaz de localizar os vazios com 150mm de comprimento e a 216mm de profundidade com um erro inferior a 13mm. Embora a detecção de vazios seja uma das primeiras aplicações do GPR para pavimentos, têm sido frequentemente relatados resultados pouco satisfatórios (Morey 1998, Al-Qadi 2002). Um problema ao usar o GPR para detetar os vazios sob lajes é a quantidade de humidade encontrada nos vazios. Quando os vazios são secos, semi-secos ou saturados, o padrão do GPR é completamente diferente. Além disso, a presença de reforço (armadura metálica, fibras, etc.) pode afetar a capacidade do GPR para identificar com êxito os espaços vazios. No entanto, o GPR é uma ferramenta útil para a detecção de vazios. Um estudo recente afirma que ainda há grande potencial do GPR acoplado ao terreno com 400MHz para localizar espaços vazios com profundidades, que variam de 50 a 400mm, e para localizar outros espaços vazios sob o reforço, apesar de ser recomendado a perfuração para determinar a extensão e profundidade dos vazios (Chen e Scullion 2008). Dada a pequena profundidade dos vazios por baixo das lajes, a sua detecção é sempre um desafio (Al-Qadi 1996).

O desenvolvimento de vazios ocorre em sequência de consolidação ou erosão dos materiais da base. Estes vazios desenvolvem-se essencialmente na proximidade dos pontos de fluxo da água que acede ao pavimento e provoca erosão interna dos finos. Em teoria, vazios, com e sem água, são ambos detetáveis, uma vez que as constantes dielétricas do ar e da água são substancialmente diferentes da maioria dos materiais que constituem os pavimentos (Saarenketo, 2006).

### 2.3.6. Fendilhação vertical

Uma desvantagem significativa de antenas tipo “*horn*” é a sua incapacidade de mostrar claramente os eventos de espalhamento hiperbólicos e a sua baixa resolução espacial lateral. Em contraste, o GPR acoplado no chão pode facilmente detetar características estruturais subtis, tais como fendas, juntas, emendas de reparação enterradas e armaduras de aço individuais. Para melhorar a avaliação da estrutura do pavimento, é importante perceber as respostas do GPR. Trabalhos anteriores sobre este assunto têm-se concentrado em redes de estradas e pistas para avaliação de danos estruturais (Benedetto e Pensa, 2007).

No entanto, Diamanti, Redman, 2011 realizaram estudos neste campo. Nele, os autores apresentaram modelos numéricos 2D e 3D de secções transversais de pavimentos com fissuras verticais. Devido ao diminuto tamanho dessas fendas, resoluções elevadas são necessárias para detetar e caracterizar nos pavimentos essa fendilhação vertical. Os dados de GPR foram adquiridos com antenas acopladas ao solo devido ao facto de só estas conseguirem transmitir a energia necessária ao terreno, para além do facto de que, hoje em dia, os sistemas mais modernos permitirem utilizar estas antenas a velocidades mais elevadas, compatíveis com as velocidades de circulação em estrada. Antes de realizarem as pesquisas de campo, iam utilizar o GPR com 1000 MHz que era o que melhor se adequava para caracterizar e detetar a fendilhação vertical. No entanto, em alguns pavimentos, como as pesquisas de campo concluíram, o GPR de 250 MHz, muitas vezes fornece uma resposta mais distinta de fendas verticais que o GPR de 1000 MHz. Para as pesquisas de Diamanti, Redman, 2011, o GPR de 250 MHz foi mais eficaz na deteção de fendilhação. No entanto, ainda acharam que o GPR de 1000 MHz era mais apropriado para a caracterização de fendilhação devido à sua resolução superior.

Descobriram que as fissuras se manifestam em forma de hipérbolos, como se observa na Figura 11, que, em alguns casos, são visíveis tanto na parte superior como na parte inferior das fissuras. Muitas vezes, a resposta mais forte parece ser a partir da parte inferior da fenda, onde se cruza a parte inferior do pavimento. Esta resposta é aumentada pela presença de substrato granular. Compararam as secções transversais GPR para os resultados de modelagem numérica com os dados de campo, e concluíram que os resultados eram semelhantes.

Os trabalhos dos investigadores, no futuro, concentrar-se-ão em alargar o modelo da estrutura do pavimento e a implementação de um sistema de antena completa nos modelos numéricos que utilizaram. Além disso, passarão por investigar ainda mais os efeitos de onda que parecem estar presentes nos dados de campo com 250 MHz (Diamanti e Redman, 2011).

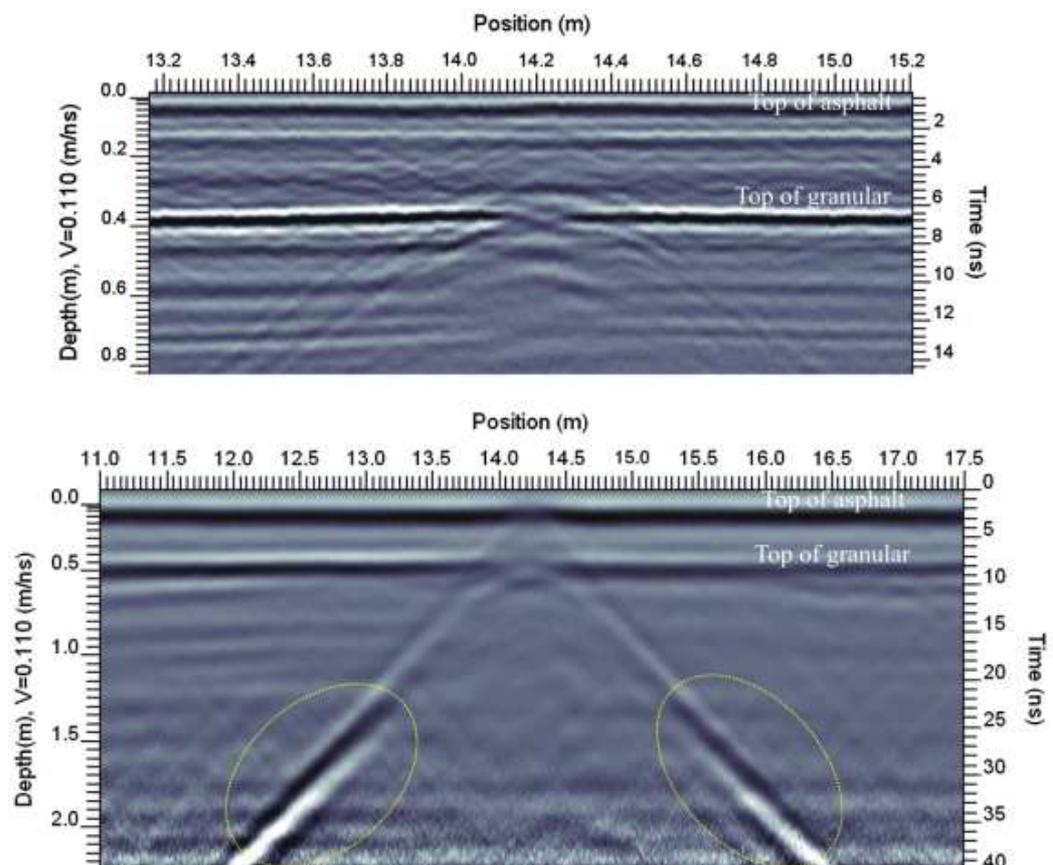


Figura 11 - Exemplo da pesquisa de Diamanti e Redman (2011), dados em GPR fendilhações. As secções transversais em GPR para 1000 (superior) e 250 MHz (inferior) de pavimentos com espessura de 350 mm.

### **3. ANÁLISE LABORATORIAL**

Os seguintes ensaios laboratoriais foram efetuados com a intenção de comprovar que o georadar é uma técnica válida na obtenção de resultados a nível de deteção de humidade nos pavimentos, assim como na deteção de fendilhamento.

#### **3.1. Deteção de humidade em pavimentos através do GPR**

A capacidade do GPR para detetar a presença de humidade em pavimentos betuminosos foi avaliada em ensaios realizados em duas fases, uma fase laboratorial e outra fase que consistiu na modelação numérica dos dados. Este capítulo é dedicado à descrição dos ensaios laboratoriais.

Estes ensaios decorreram no laboratório de engenharia civil, na parte de vias de comunicação da Universidade do Minho. O objetivo destes ensaios foi tentar verificar se os resultados do GPR poderiam transmitir informação sobre o conteúdo em humidade nos pavimentos betuminosos e tentar estabelecer algum tipo de relação entre a humidade, as características dos pavimentos e os resultados do georadar (velocidade, amplitude, frequência).

As lajes ensaiadas apresentavam as seguintes dimensões:  $70 \times 50 \times 7 \text{cm}^3$ . A Tabela 1 apresenta as características das lajes ensaiadas, nomeadamente as percentagens de betume, porosidade, etc. Estas foram envolvidas lateralmente por uma argamassa de cal para que a água não possa escoar e se possa manter o máximo de tempo possível dentro da laje (ver Tabela 2 e Figura 12). Adicionalmente foi colocada uma folha de alumínio por baixo destas de maneira a acentuar o sinal oriundo dessa interface. Para medir a presença de humidade, calculou-se a percentagem de água necessária para atingir uma determinada percentagem de humidade, nomeadamente: 5, 10, 20 e 40%. Essa taxa de humidade foi sucessivamente atingida ao fim de quatro fases, durante as quais foram efetuadas medições (ver Tabela 2). O procedimento laboratorial foi o seguinte:

1. Medição com georadar nas lajetas secas;
2. Pulverização de água nas lajetas, recorrendo ao pulverizador ilustrado na Figura 12 de maneira a atingir um grau de humidade de 5%;

3. Medição com georadar imediatamente após a pulverização;
4. Pulverização adicional (+5%) de água nas lajetas de maneira a atingir um grau de humidade de 10%;
5. Medição com georadar imediatamente após a pulverização;
6. Pulverização adicional (+10%) de água nas lajetas de maneira a atingir um grau de humidade de 20%;
7. Medição com georadar imediatamente após a pulverização;
8. Pulverização adicional (+20%) de água nas lajetas de maneira a atingir um grau de humidade de 40%;
9. Medição com georadar imediatamente após a pulverização;

**Tabela 1 – Características das lajes.**

Lajetas	Características físicas das lajetas			
	BMT (g/cm <sup>3</sup> )	Teor Betume (%)	Densidade	Porosidade (%)
1	2,5	5	2,37	5
2	2,52	4	2,37	6
3	2,46	6	2,37	3,7
4	2,5	5	2,1	15,9
5	2,53	4	2,1	16,9
6	2,46	6	2,1	14,6



**Figura 12 - Aspeto das lajetas utilizadas nos ensaios laboratoriais e pulverizador utilizado para salpicar a água sobre as lajetas.**

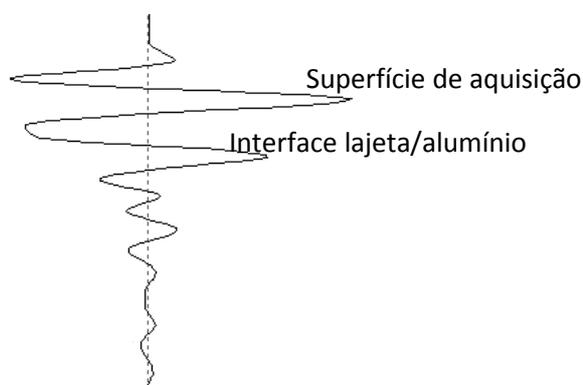
**Tabela 2 – Quantidade de água pulverizada em cada laje.**

Lajeta s	Quantidade de água pulverizada em cada laje (g)			
	1ª fase	2ª fase	3ª fase	4ª fase
1	65	130	260	520
2	77	154	308	616
3	48	96	192	134
4	205	410	820	1620
5	218	436	871	1742
6	187	375	749	1498

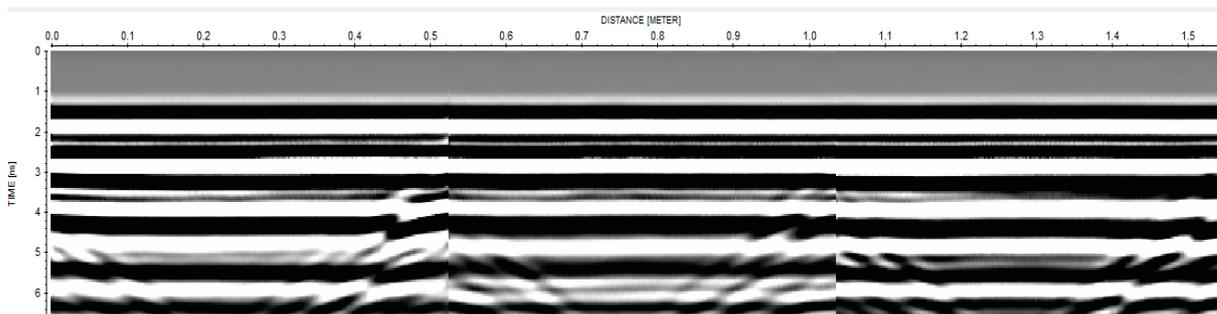
Devido à pequena espessura da lajeta foi utilizada a antena de 1.6GHz de alta frequência. Para ter em conta a variabilidade da porosidade na lajeta e, conseqüentemente, da quantidade de água, efetuaram-se em cada lajeta três leituras longitudinais e foi obtida a média dessas leituras. A fim de simular convenientemente a água da chuva a cair sobre o pavimento, foi utilizado o pulverizador ilustrado na Figura 12 para obter uma distribuição o mais uniforme e próxima da realidade quanto possível. As medições realizadas com o georadar utilizaram os seguintes parâmetros:

- Janela de tempo de 6ns;
- Frequência de amostragem superior a 20GHz.

Devido à resolução desta antena, as superfícies, superior e inferior, da laje foram escolhidas como sendo os picos mais elevados e positivos num traço singular, conforme ilustrado na Figura 13.



**Figura 13 – Traço individual típico das leituras realizadas sobre as lajetas.**



**Figura 14 – Exemplo de radargrama (três leituras consecutivas e separadas nas lajetas).**

Na Figura 14 podemos ver o radargrama que ilustra o resultado das três leituras realizadas numa das lajetas, o radargrama é analisado em termos de tempo, em nanosegundos, e distancia, em metros.

Os resultados revelaram genericamente que a presença de humidade é visível em alguns parâmetros, como a velocidade de propagação que diminui em algumas passagens do georadar, e a amplitude do sinal, logo após o borrifo de água na superfície, independentemente das propriedades das placas.

Em lajes mais porosas, a diminuição da velocidade de propagação da onde eletromagnética não é tão elevada, uma vez que a água escoo mais rapidamente através dos poros do que nas outras lajes, ou seja, o efeito da humidade é pouco detetável nessas lajes.

Nos 1º e 2º dias de ensaio, as lajes, passada uma hora da molhagem, já começavam a dar sinais de secagem, nomeadamente, a laje 3 foi a primeira a apresentar sinais de secagem, seguindo-se as lajes 1, 2, 6, 4 e 5. Ao final de duas horas, todas as lajes já se apresentavam quase todas secas (ver Figura 15 e Figura 16), numa avaliação feita visualmente.



**Figura 15 – Lajes 3 e 1, respetivamente, passadas duas horas do início do ensaio.**

O ensaio decorreu durante o mês de março, por isso o tempo estava húmido, mas as lajes mantiveram-se sempre dentro do laboratório, que apresentava uma temperatura ambiente e as lajes secaram normalmente ao ar natural.



**Figura 16 – Lajes no segundo dia ao fim de uma hora.**

No terceiro dia de ensaio, passadas vinte e quatro horas, antes do começo do terceiro ensaio, todas as lajes estavam completamente secas, ou seja, voltamos aos valores iniciais de cada laje. Ao contrário dos ensaios anteriores, no terceiro dia, após a pulverização das lajes, estas ainda estavam bastante húmidas passada uma hora do início do ensaio, só dando sinais de secagem passadas duas horas.

No último dia de ensaio, ou seja, com quarenta por cento de humidade, as lajes foram borrifadas com uma grande quantidade de água, por isso nem passadas duas horas elas começaram a secar, como se pode verificar na Figura 17, começaram a dar sinais de secagem passado três horas da pulverização, e passado vinte e quatro horas, estavam completamente secas.



**Figura 17 – Lajes no último dia ao fim de duas horas.**

Como já foi referido, após 24 horas, a superfície secou voltando os valores da amplitude aos seus valores iniciais. Então, isto demonstra que os betões betuminosos porosos têm uma capacidade rápida de secagem.

Nestes ensaios à humidade pude concluir que as lajetas eram demasiado porosas e toda a água nelas depositada escoava para fora, sendo que o resto evaporava rapidamente, mostrando-nos que no tempo das medições, principalmente uma hora depois, já não havia existência quase nenhuma de água dentro delas. Neste sentido, nos registos com o GPR foi demonstrado que a velocidade da propagação da onda dos cinco para os quinze minutos e dos quinze minutos para uma hora, aumentava, ou seja, era a prova que a água já quase não estava presente nas lajetas.

Nas lajetas mais porosas, nomeadamente as lajetas 4, 5 e 6, a velocidade dos zero aos cinco minutos descia, mas dos cinco aos quinze já apresentava um aumento novamente, sendo esse aumento ainda mais acentuado dos quinze aos sessenta minutos. Podemos observar isso nas Figuras 21, 22 e 23. Nas figuras 18, 19 e 20, também presenciamos um declínio da velocidade de propagação da onda até aos cinco minutos e depois até aos sessenta minutos um

crescimento da mesma, embora estas lajetas tenham um índice de porosidade menor que as outras.

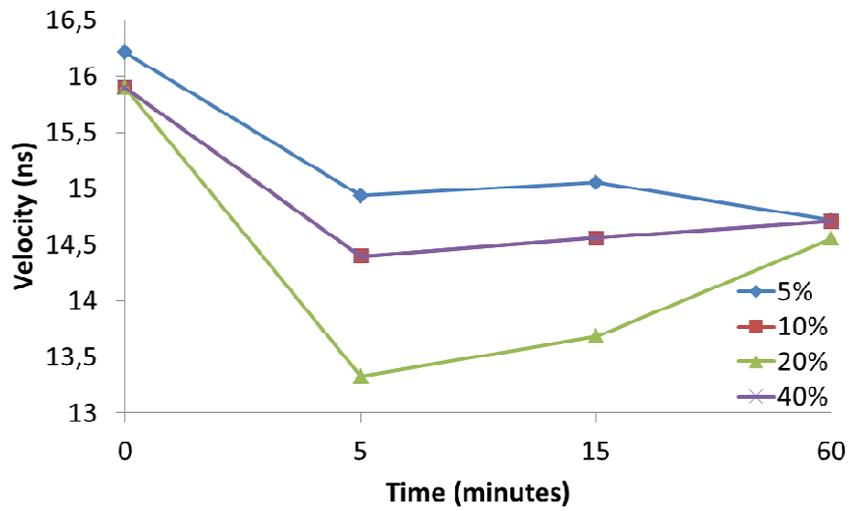


Figura 18 – Análise da humidade na laje 1.

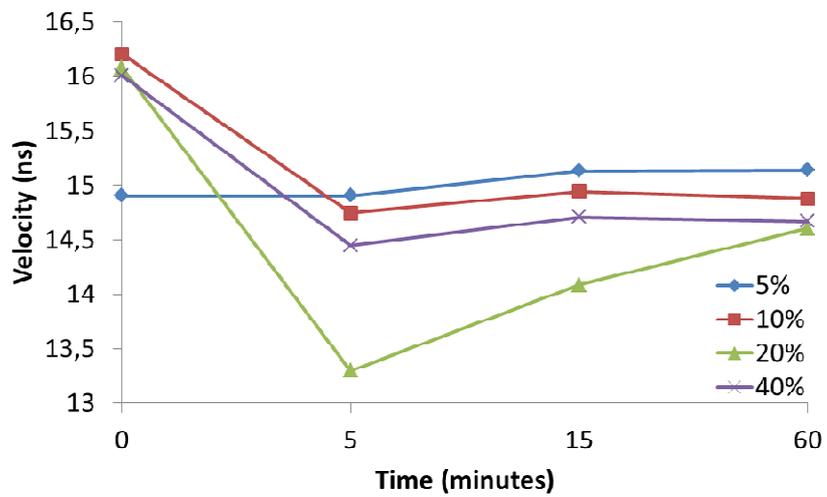


Figura 19 – Análise da humidade na laje 2.

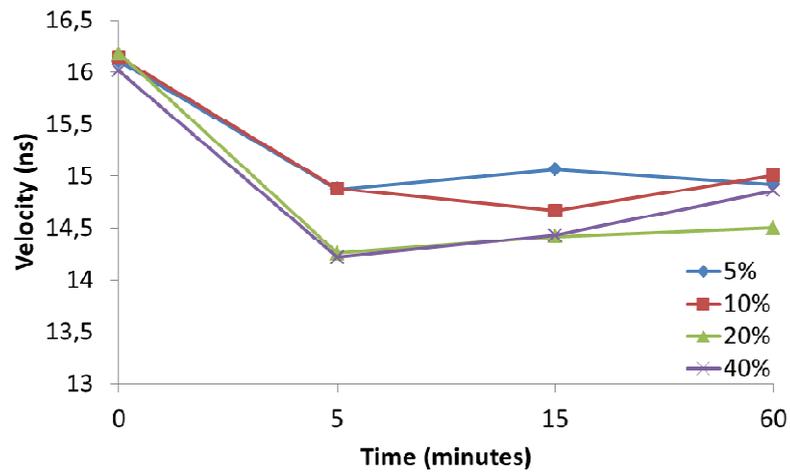


Figura 20 – Análise da humidade na laje 3.

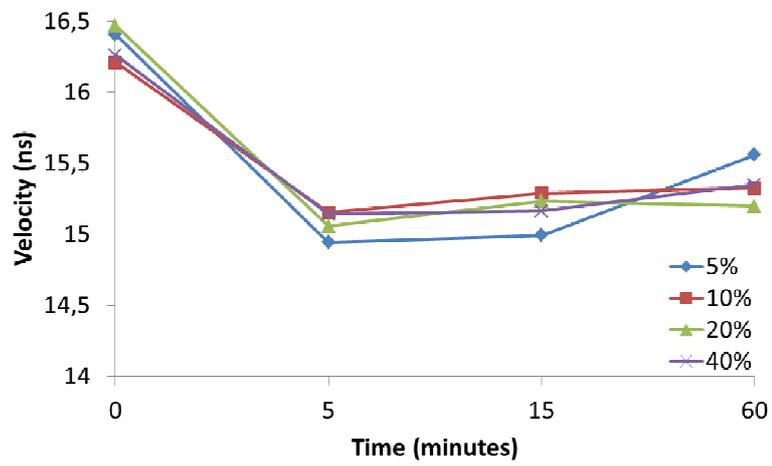


Figura 21 – Análise da humidade na laje 4.

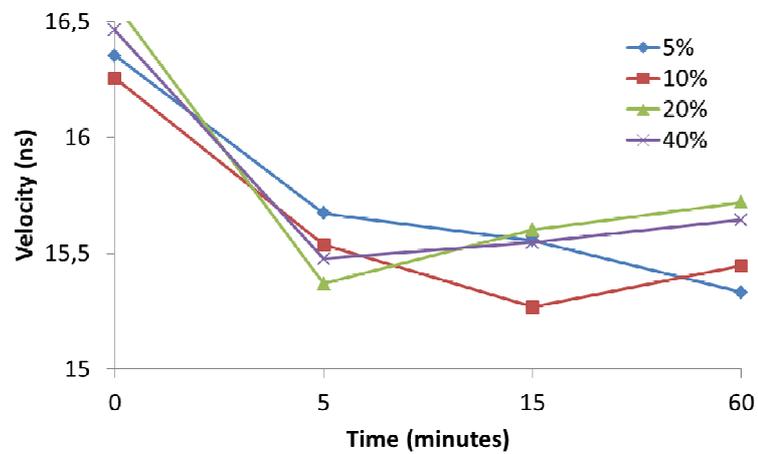
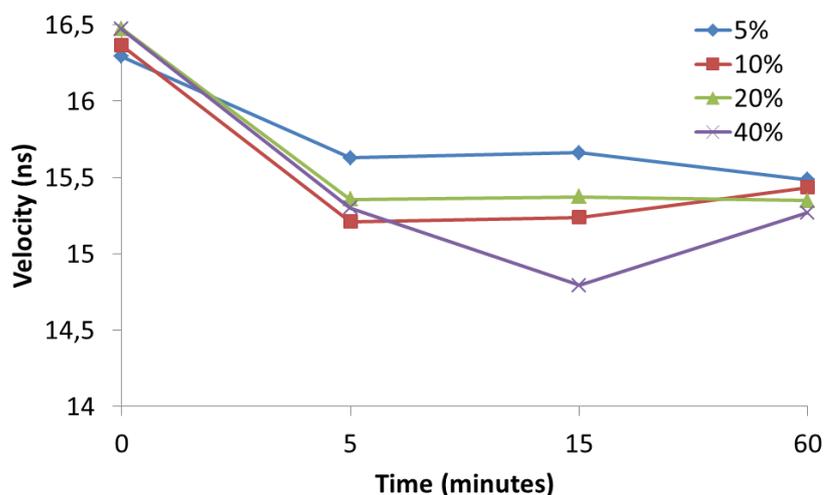


Figura 22 – Análise da humidade na laje 5.

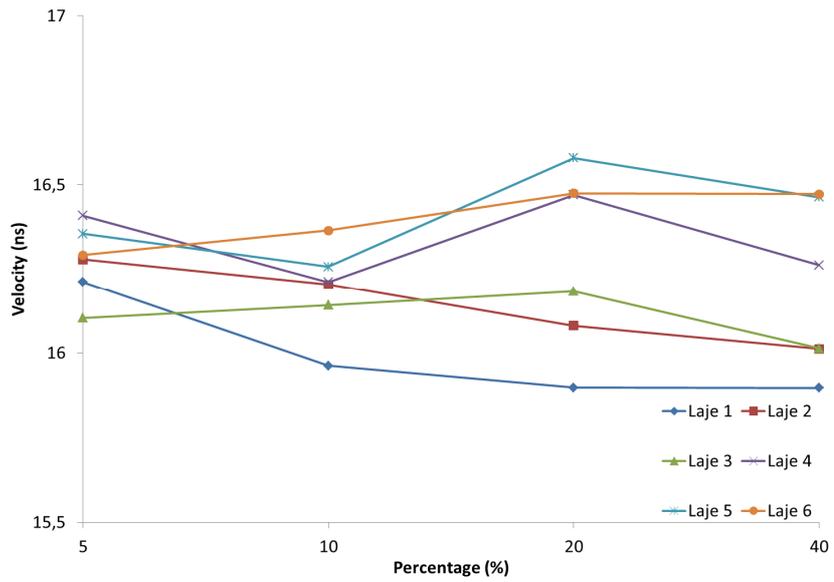


**Figura 23 – Análise da humidade na laje 6.**

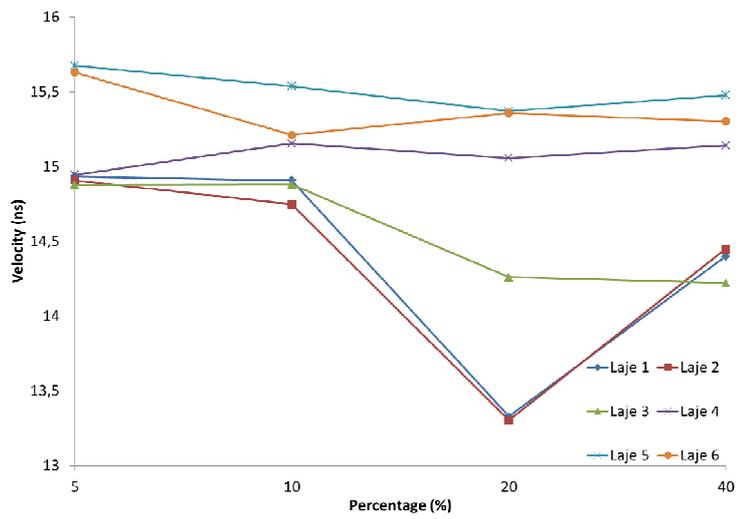
Para comparar os resultados dados nos graficos acima representados, foram feitos novos graficos, com os mesmos dados, mas em vez de fazer um grafico para cada lajeta, foi feito um grafico para cada de passagem do georadar, ou seja, aos zero minutos, aos cinco minutos, aos quinze minutos e aos sessenta minutos.

Então, pela Figura 24, que é a passagem do georadar aos zero minutos a a propagação da onda através da lajeta, é mais ou menos uniforme, dependendo também da porosidade de cada lajeta que afecta também a velocidade de propagação da onda. Na Figura 25 que é a análise da humidade aos cinco minutos, já se deteta uma redução acentuada da velocidade do sinal, principalmente nas lajetas 1 e 2, que são as lajetas menos porosas, nota-se esse acentuamento principalmente no ensaio com 20% de humidade.

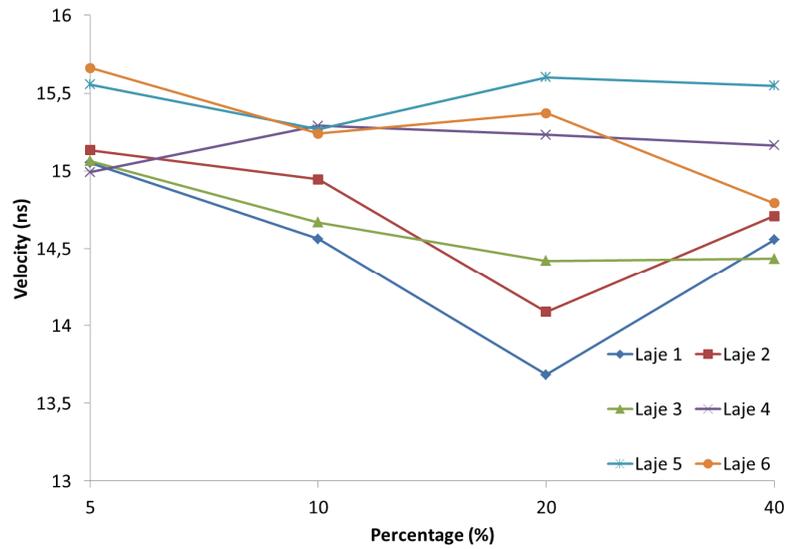
Nos Figuras 26 e 27, já se começa a perceber outra vez o crescimento da velocidade do sinal, tendo na mesma um acentuamento na mesma no ensaio aos 20% de humidade.



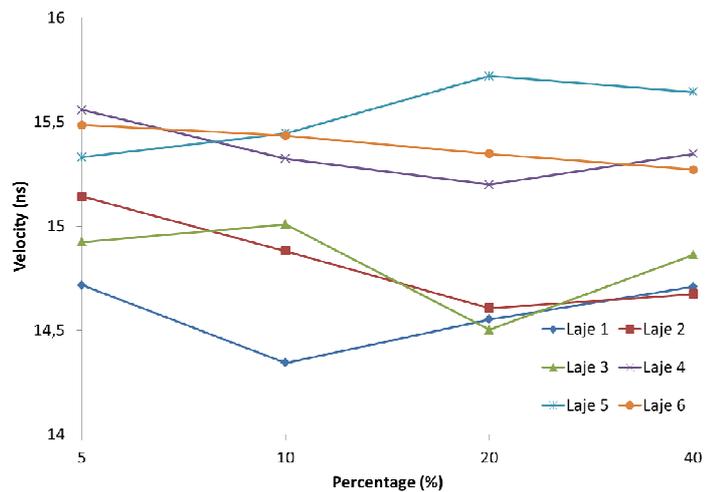
**Figura 24 - Análise da humidade aos 0 minutos.**



**Figura 25 - Análise da humidade aos 5 minutos.**



**Figura 26 - Análise da humidade aos 15 minutos.**



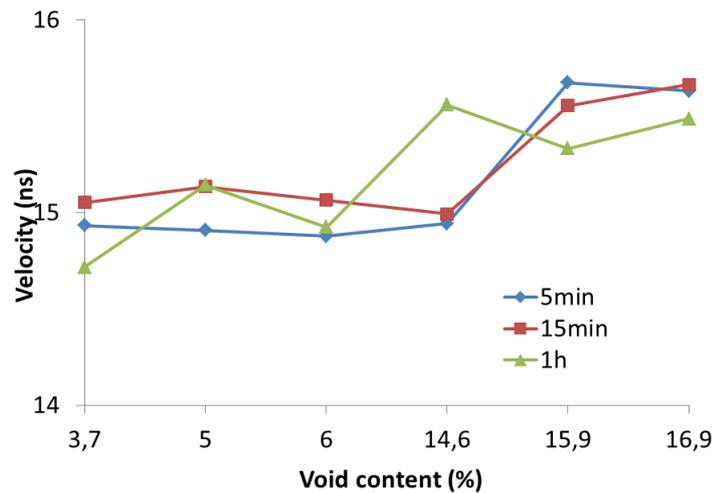
**Figura 27 - Análise da humidade aos 60 minutos.**

A análise da humidade de seis placas betuminosas com diferentes densidades foi avaliada com o radar de penetração de solo.

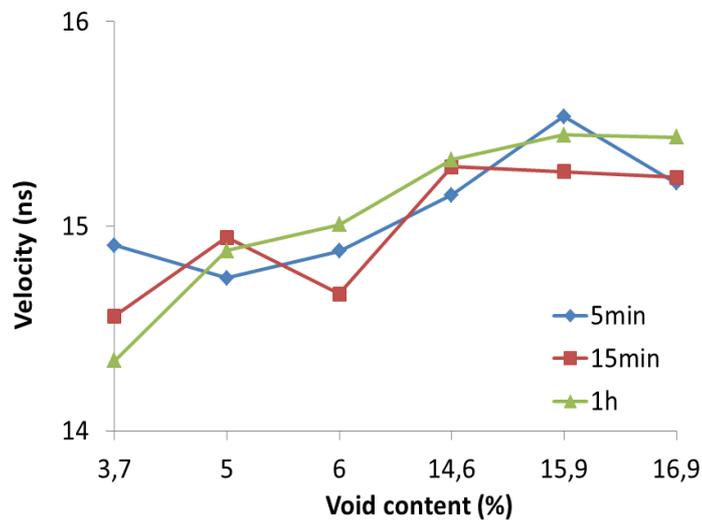
Pelos gráficos obtidos em relação aos dados retirados do programa ReflexW, conseguimos perceber que a humidade nas lajetas afeta a propagação da onda, mesmo que por pouco tempo, uma vez que a humidade desaparece rapidamente. Os resultados mostraram que a velocidade de propagação da onda do radar e as amplitudes dos sinais, em ambas as superfícies da laje, podem indicar a presença de humidade, quando em comparação com uma referência anterior, em estado seco. Materiais porosos indicam mudanças muito pequenas no

teor de humidade. No entanto, materiais com maior densidade betuminosa acumulam maior humidade durante períodos mais longos, afetando assim seus resultados.

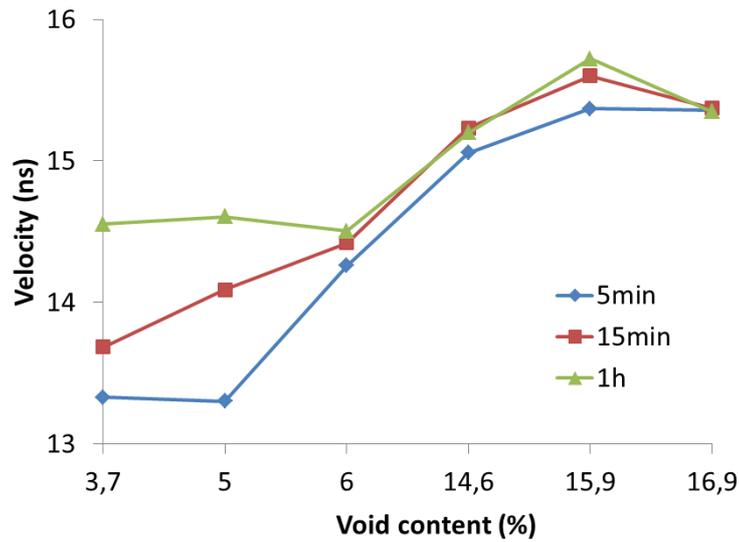
Relacionando a velocidade com a porosidade do material, consegue ver-se pelos gráficos, apresentados na Figura 28, que, nos vários momentos medidos pelo GPR, a velocidade diminui um pouco nos primeiros momentos e, de seguida, volta a subir, mas também a diferença não é muito grande devido à porosidade elevada do material testado (ver tabela 1).



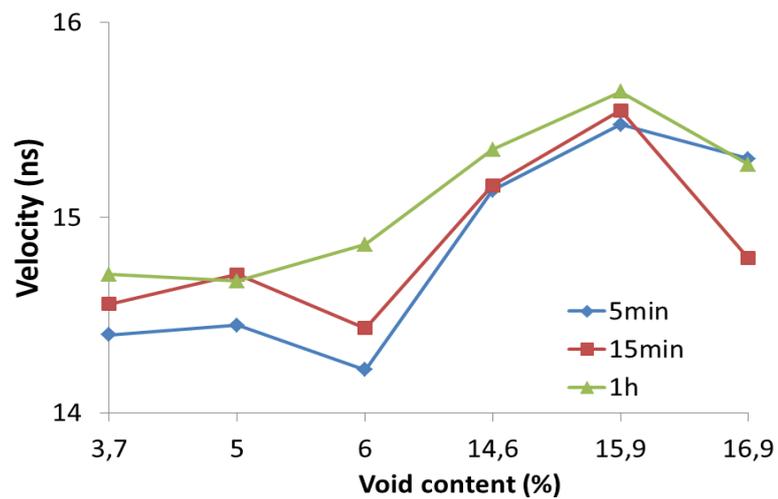
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 28 – Evolução da velocidade de propagação com a porosidade e a taxa de humidade prevista. (a) aos 5%, (b) aos 10%, (c) aos 20% e (d) aos 40%.

Posteriormente, com as amplitudes obtidas no programa ReflexW, foi possível calcular os valores dielétricos das camadas, sendo que com as superfícies superiores e inferior da laje foram escolhidos os picos mais elevados e positivos do rastreio. Como referido anteriormente, a equação seguinte apresenta o algoritmo para o cálculo do valor da superfície dielétrica.

$$\epsilon_a = \left( \frac{1 + \frac{A_1}{A_m}}{1 - \frac{A_1}{A_m}} \right)$$

Onde:

- $\epsilon_a$ : é o valor dielétrico da camada do pavimento;
- $A_1$ : é a amplitude da reflexão a partir da superfície;
- $A_m$ : é a amplitude do reflexo de uma placa de metal (100% de reflexão).

Foi esta equação que foi utilizada para calcular os valores dielétricos de cada lajeta, com as amplitudes para as diferentes percentagens de água. A amplitude  $A_m$  foi obtida através da reflexão da folha de alumínio.

Em baixo, está representada a tabela feita para a percentagem de água de 5 por cento, aos cinco minutos de ensaio em cada lajeta. Na tabela, observa-se as amplitudes retiradas do software ReflexW e o respetivo cálculo da constante dielétrica de cada lajeta que está representado por  $\epsilon_a$ .

**Tabela 3 – Valores das amplitudes e constante dielétrica.**

	Wet Slabs 5% - 5min			
	Amplitude first	Amplitude last	Ratio amplitudes	$\epsilon_a$
Slab 1	12593	20730	0,61	4,10
Slab 2	12381	21491	0,58	3,72
Slab 3	11921	21158	0,56	3,58
Slab 4	13083	21984	0,60	3,94
Slab 5	14556	24455	0,60	3,94
Slab 6	12718	23214	0,55	3,42

Deste ensaio pode-se concluir que conseguimos perceber que a humidade nas lajetas afeta a propagação da onda, mesmo que por pouco tempo, no caso das lajetas porosas, uma vez que a humidade desaparece rapidamente. No entanto, materiais com maior densidade betuminosa, que acumulam maior humidade durante períodos mais longos, afetam os seus resultados. Concluimos que a velocidade de propagação da onda do radar e as amplitudes dos sinais, em ambas as superfícies da laje, podem indicar a presença de humidade.

### **3.2. Detecção de fendas em pavimentos através de GPR**

Nesta fase do trabalho laboratorial foi realizado um ensaio em provetes na forma de viga prismática dispostas de tal forma a simular diversos tipos de fendilhação no pavimento, tentando validar a técnica georadar neste ramo, na tentativa de caracterizar os pavimentos rodoviários com recurso a métodos não destrutivos.

A configuração do equipamento utilizado, ilustrado na Figura 29, consistiu numa unidade de controlo CU II e uma antena de frequência central de 1,6 GHz, devido ao facto de se tentar detetar fendas de diminuta dimensão.



**Figura 29 – Foto do equipamento utilizado: unidade de controlo, monitor e antena de 1.6GHz.**

Este ensaio foi dividido em duas partes. Na primeira parte foram utilizadas apenas duas vigas lado a lado, tentando simular uma fenda vertical superficial no pavimento (fenda iniciada de cima para baixo) e, na segunda parte, com duas vigas adicionais, tentando simular uma fenda vertical no interior do pavimento, abaixo da camada superficial (fenda iniciada de baixo para cima). A espessura das fendas varia desde aproximadamente 1 mm (vigas justapostas) até aos 20 mm. Os provetes foram colocados sobre uma mesa metálica, pelo que não foram medidas os elementos por baixo da mesa.

Na primeira parte do ensaio, as duas vigas lado a lado foram sendo afastadas à medida que o ensaio decorria, dos zero aos vinte milímetros. A cada milímetro era utilizado o georadar, passando-o transversalmente por cima das vigas. Na Figura 30a pode ver-se as vigas colocadas paralelamente, afastadas de 5 mm, e por baixo a mesa de tampo metálico onde foi realizado o ensaio. A Figura 30b ilustra as vigas afastadas de 20 mm. Nas Figuras 31 e 32 estão ilustrados os resultados obtidos durante os ensaios nessas vigas.

Relativamente aos resultados, nada é detetado até aos cinco milímetros (Figura 31a). A partir dos cinco milímetros começa a notar-se uma leve alteração da amplitude do sinal refletido na zona da fenda. Essa alteração está anotada nos radargramas das Figura 31b e Figura 31c. A deteção da fenda começa a ficar mais perceptível a partir dum afastamento igual a 9 mm (Figura 32a). Com uma largura de 20 mm (Figura 32c), a fenda é perfeitamente perceptível. No

entanto, o sinal é relativo à descontinuidade provocada pela fenda e é superficial, sem qualquer informação em profundidade da fenda. Cada radargrama é avaliado em tempo, em nanosegundos, e distância em metros, na vertical e na horizontal, respetivamente.

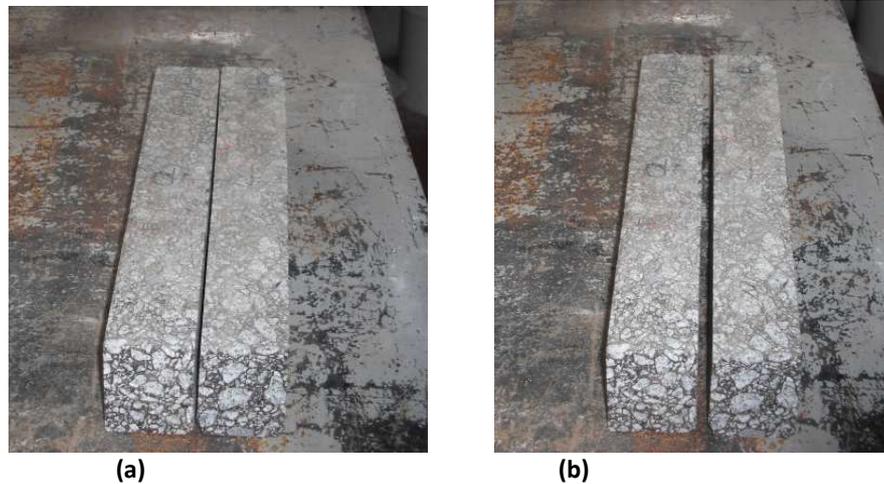


Figura 30 – Duas vigas colocadas paralelamente afastadas de (a) 5 mm e (b) 20 mm.

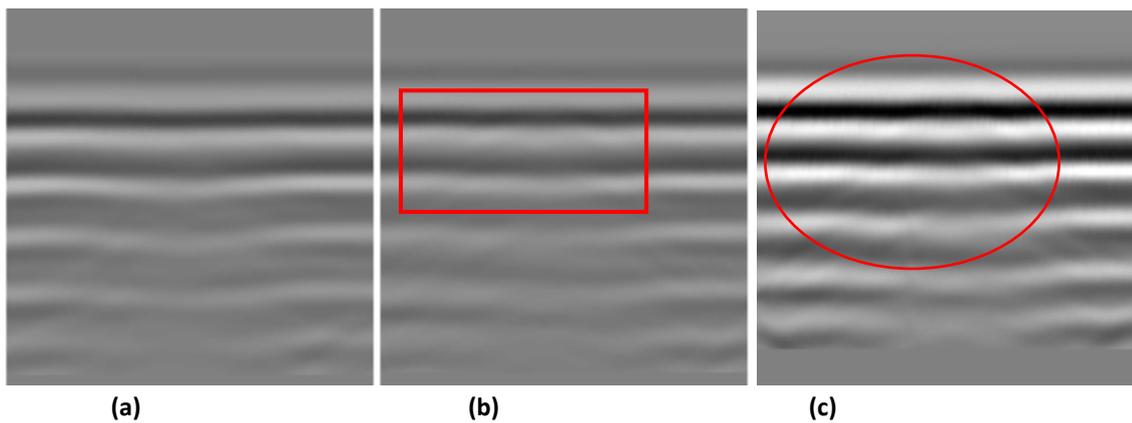


Figura 31 – Radargramas ilustrativos da passagem por uma fenda com (a) zero, (b) cinco e (c) sete milímetros de largura.

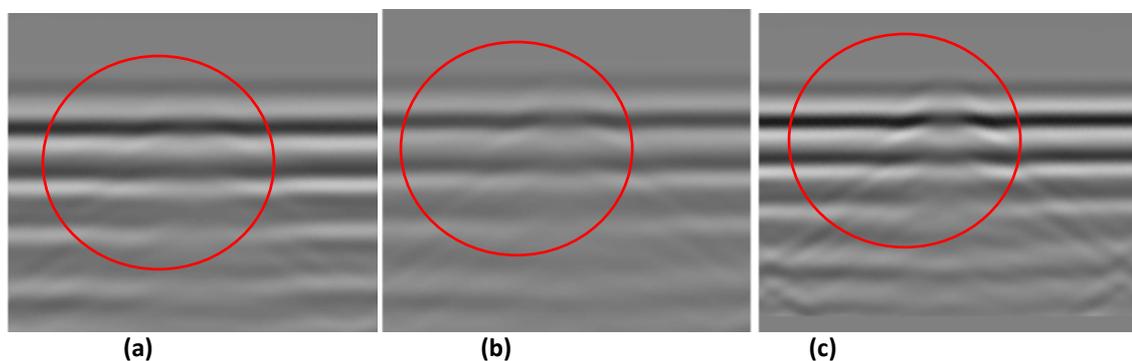


Figura 32 – Radargramas ilustrativos da passagem por uma fenda com (a) nove, (b) quinze e (c) vinte milímetros de largura.

Na segunda parte do ensaio foram utilizadas quatro vigas, duas em baixo e duas em cima, as duas de cima colocadas transversalmente às duas de baixo, formando uma “cruz”, conforme ilustrado na Figura 33. As duas vigas que ficaram por baixo iam sendo afastadas dos zero até aos vinte milímetros, com o intuito de detetar a fenda por baixo do pavimento superficial. As duas vigas que ficam por cima foram mantidas sempre juntas para simular uma camada de betuminosa superficial não fendilhada (as fendas ocorrem na face inferior da mistura em direção à superfície do pavimento).



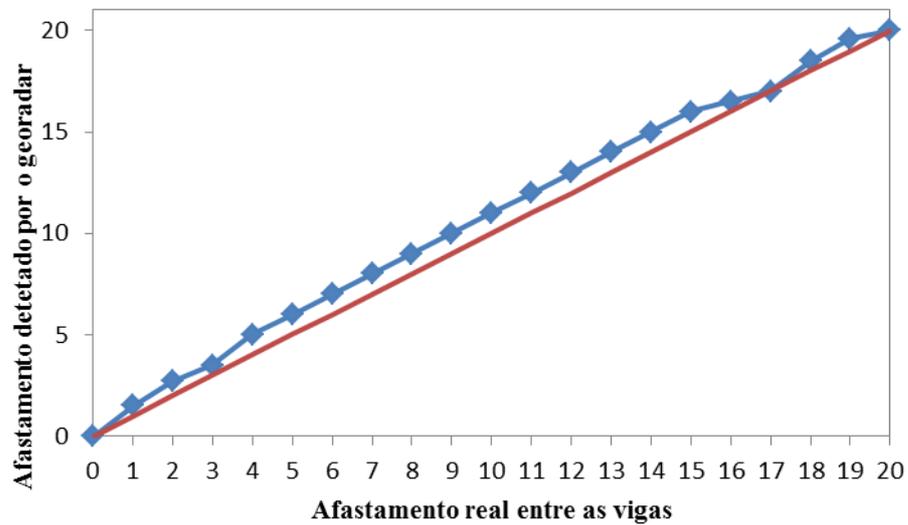
**Figura 33 – Vigas colocadas para simular uma fenda vertical ocorrida por baixo do pavimento (separação das vigas inferiores: 5 mm).**

Os resultados destes ensaios evidenciam alguma reflexão relativamente forte nas duas vigas de baixo, provavelmente devido à reflexão causada pela superfície metálica da mesa de apoio. Podem ver-se nos radargramas das Figura 35 e Figura 36 os resultados da passagem da antena de 1.6 GHz pelas vigas com o objetivo de detetar a fenda de largura crescente (0-20 mm). Nesses radargramas também é possível observar que as vigas superiores não evidenciam nenhuma reflexão. Em todos os radargramas é possível observar os sinais seguintes:

- a) Superfície de aquisição dos dados;
- b) Interface entre as vigas superiores e inferiores (só detetada só na parte suspensa das vigas superiores devido ao elevado contraste entre o betuminoso e ar);
- c) Superfície de contacto entre as vigas e a superfície metálica da mesa.

À medida que a distância entre as vigas inferiores vai aumentando no decorrer do ensaio, consegue observar-se uma mudança na reflexão da antena que vai crescendo com essa separação. Aos 20 mm esse afastamento é muito evidente.

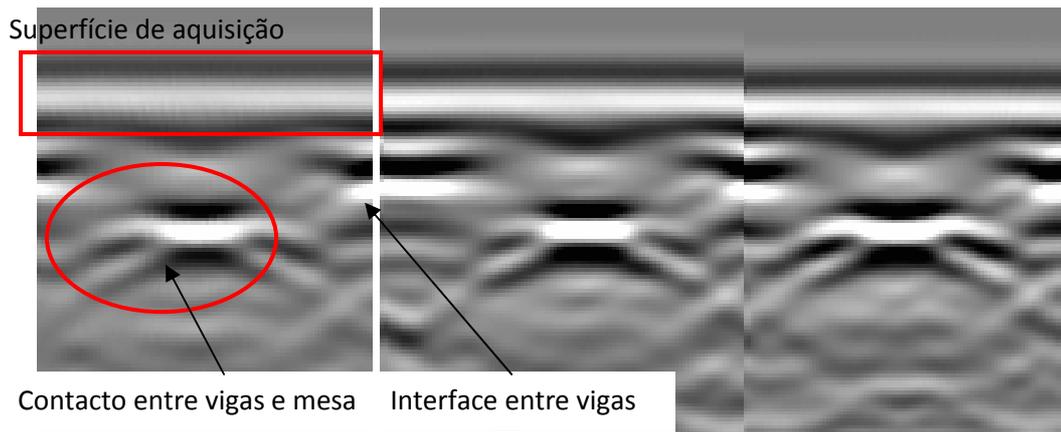
Para evidenciar esse afastamento entre as vigas, os resultados foram apresentados num gráfico, que se pode ver na Figura 34, onde se evidencia esse crescimento, a linha azul é o afastamento medido pelo georadar e a linha vermelha é o afastamento real entre as vigas.



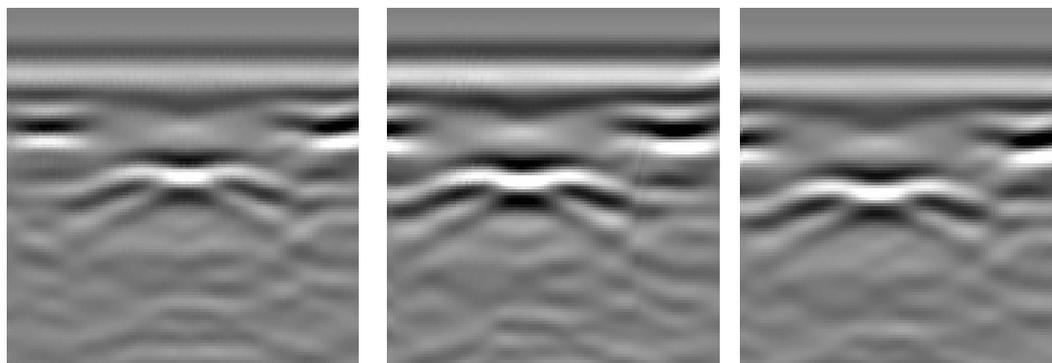
**Figura 34 - Gráfico do afastamento entre as fendas**

Pode concluir-se que o GPR consegue detetar as fendas verticais presentes à superfície na camada superficial e sob o pavimento, que não são visíveis, de uma forma semelhante, ou seja, através duma hipérbole que denota uma descontinuidade no material por onde as ondas se propagam. Em ambas as situações, a amplitude do sinal refletido é proporcional à abertura da fenda e existe elevado contraste nos materiais adjacentes à fenda.

Como se observa na Figura 35 e 36, onde conseguimos ver através do radargrama a deteção de fendas sob uma camada betuminosa intacta.



**Figura 35 – Radargrama da deteção de fendas sob uma camada betuminosa de vigas afastadas por um, sete e dez milímetros (da esquerda para a direita).**



**Figura 36 – Radargrama da deteção de fendas sob uma camada betuminosa de vigas afastadas por quinze, dezoito e vinte milímetros (da esquerda para a direita).**

#### 4. ANÁLISE NUMÉRICA

Para complementar o estudo do GPR em pavimentos, foi feita uma análise numérica dos dados obtidos em laboratório nos ensaios à humidade, com o objetivo de confirmar os resultados experimentais. Para isso foi utilizado o GprMax2D, um *software* de análise dos campos eletromagnéticos baseado no método das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD). Neste capítulo será explicado como os dados foram introduzidos e o processo de análise e comparação dos resultados.

Para executar um modelo 2D usando o GprMax2D, deve-se criar um ficheiro texto ASCII como entrada dos dados do problema em que os parâmetros do modelo são especificados e que pode ser preparado com qualquer editor de texto. A estrutura desse ficheiro de entrada de dados é explicada em pormenor de seguida.

Esse ficheiro tem que conter todas as informações necessárias para executar a simulação dum modelo no GprMax2D. Todos os parâmetros e comandos são precedidos pelo carácter reservado cardinal (#), devem ocupar uma única linha de entrada e apenas um comando por linha é permitido. Se a linha começar com qualquer outro carácter é ignorado pelo programa, podendo assim, serem inseridos comentários do utilizador ou descrições. No caso de o comando não estar escrito corretamente, o programa irá abandonar a execução e procede à emissão de uma mensagem de erro. Quando um comando requer mais do que um parâmetro, então estes são separados usando um espaço em branco.

De maneira a facilitar a compreensão ao leitor, os valores utilizados nestas simulações vão sendo descritos à medida que vão sendo apresentados os comandos utilizados. Assim, os comandos utilizados neste trabalho para o funcionamento do ficheiro são:

#medium:	#box:	#rx:	#geometry_file:
#domain:	#line_source:	#tx_steps:	#title:
#dx_dy:	#analysis:	#rx_steps:	#messages:
#time_window:	#tx:	#end_analysis:	

### **#medium: f1 f2 f3 f4 f5 f6 str1**

Com o comando `médium` são introduzidos os diversos materiais (`str1`) presentes na análise e os parâmetros que descrevem um determinado meio (`f1`, `f2`, `f3`, `f4`, `f5` e `f6`), i.e., as suas características dielétricas e outras relevantes para a propagação de ondas eletromagnéticas:

1. `f1` é a permissividade relativa do meio:  $\epsilon_{rs}$ .
2. `f2` a permissividade relativa a uma frequência infinita:  $\epsilon_{r\infty}$ .
3. `f3` o tempo de relaxamento do meio,  $\tau$ , em segundos.
4. `f4` a condutividade elétrica estática do meio  $\sigma$  (Siemens / metro )
5. `f5` a permeabilidade relativa do meio  $\mu_r$ .
6. `f6` a condutividade do meio magnético  $\sigma^*$ .
7. `str1` identificador do meio/material.

Tendo em conta que os materiais utilizados não são magnéticos nem ferrosos, os parâmetros `f3=f4=f6=0` e `f5=1`. Os valores utilizados para os materiais nas seguintes simulações foram:

1. Camada de betão betuminoso: **#medium: 6 0 0 0.005 1 0 asphalt** (permissividade relativa: 3-5; condutividade elétrica estática (S/m): 0.005)
2. Folha de alumínio entre betuminoso e betão: **#medium: 8.8 0 0 0.1 1 0 aluminum** (permissividade relativa: 8.1-9.5; condutividade elétrica estática (S/m): 0.1)
3. Betão do pavimento do laboratório: **#medium: 5 0 0 0.005 1 0 concrete** (permissividade relativa: 4-6; condutividade elétrica estática (S/m): 0.005)

Durante estes ensaios, as constantes do alumínio e do betão foram sempre iguais, sendo que as únicas que foram alterando foram a constante dielétrica da lajeta, que era diferente consoante a percentagem de humidade presente. De maneira a ter em conta essa situação, optou-se pela seguinte regra:

1. Material seco:  $\epsilon_{rs \text{ seco}} = 3.5$ ;
2. Material molhado:  $\epsilon_{rs \text{ molhado } X\%} = \epsilon_{rs \text{ seco}} + \% \text{ Humidade} \times \epsilon_{rs \text{ água}}$

Assim, a Tabela 5 mostra as diferentes propriedades para os diversos casos de grau de humidade das diferentes lajetas. Convém desde já observar que são valores muito diferentes dos que foram detetados experimentalmente.

**Tabela 4 - Valores para a permissividade relativa das camadas de betão betuminoso a utilizar nas simulações.**

Lajetas	$\epsilon_{rs}$	$\epsilon_{rs}$ (molhado)			
		5%	10%	20%	40%
<b>1</b>	3,5	3,7	4,0	4,5	5,5
<b>2</b>	3,5	3,8	4,1	4,7	5,9
<b>3</b>	3,5	3,6	3,8	4,2	4,9
<b>4</b>	3,4	4,2	5,0	6,5	9,7
<b>5</b>	3,4	4,3	5,1	6,8	10,2
<b>6</b>	3,4	4,1	4,8	6,3	9,2

### **#domain: x y**

Com este comando define-se o tamanho global do modelo em metros. Como é uma simulação 2D, o modelo corresponde a uma secção transversal da lajeta. Neste caso específico, o modelo tem as dimensões próximas das lajetas adicionando uma camada de ar por cima e de betão por baixo. Assim, as dimensões são (comprimento  $\times$  altura): 0.7 m  $\times$  0.15 m.

### **#dx dy: x y**

Este comando serve para a definição da grelha em que se subdividirá o modelo para a sua análise através de FDTD. Como é evidente, quanto mais fina for a malha, melhores serão os resultados obtidos. Neste caso, a grelha é constituída por uma quadrícula uniforme com 0.005 m de aresta.

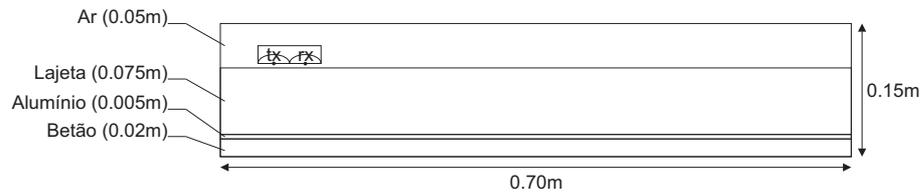
### **#time window: t**

Nos ensaios de georadar, o output é o tempo que as ondas demoram a percorrer a distância entre a sua emissão e a receção das reflexões pela antena, também designado por *two-way travel-time*. Quanto mais tempo o georadar estiver a registar, mais resultados recolhe. Neste caso, como a distância é curta menos de 15 cm, o valor para este parâmetro será de 6 ns ( $6 \times 10^{-9}$  s).

### **#box:**

O comando “box”, em conjunto com outros, permite desenhar as formas que devem ser simuladas. Neste caso, como o modelo consiste unicamente de camadas retangulares, usa-se

este comando para as definir. A secção simulada é a ilustrada na Figura 37. No ficheiro de comandos está assim:



**Figura 37 – Geometria do modelo introduzido no GprMax.**

**#box: 0.0 0.000 0.7 0.1 asphalt** (camada de betão betuminoso com 0.075 m de espessura)

**#box: 0.0 0.020 0.7 0.1 aluminum** (camada de alumínio com 0.005 m de espessura, que corresponde à mínima espessura da grelha)

**#box: 0.0 0.025 0.7 0.1 concrete** (camada de betão com 0.025 m de espessura)

**#line\_source: f1 f2 str1 str2**

Este comando serve para introduzir o tipo de onda e a sua frequência. Em geral, as ondas do georadar têm uma forma do tipo Ricker (str1) (Ricker wavelet) com uma determinada frequência (f2) (neste caso é de 1600 MHz ( $1600 \times 10^6$  Hz) e uma amplitude de 1 (f1). Onde f1 e f2 são, respetivamente, a amplitude em amperes da fonte da linha atual e a frequência em Hertz da forma de onda de excitação da fonte. O parâmetro str2 corresponde a um nome para essa frequência.

O próximo conjunto de informações constitui os comandos e a informação necessário para correr as diversas simulações.

**#analysis: i1 file1 c1**

Neste grupo de comandos estão as instruções relativas à análise efetiva. O parâmetro i1 corresponde ao número de locais onde será calculada a amplitude das ondas eletromagnéticas emitidas. Na prática, corresponde ao número de traços (GPR *single traces*) que o modelo tem que criar. Quanto maior este número maior será a resolução. No entanto, requer mais tempo de processamento e uma grelha mais refinada. Nas simulações serão calculados um total de 120 traços. O parâmetro *file1* é o nome do ficheiro onde todos os resultados vão ser

armazenados (extensão.out). O parâmetro *c1* corresponde a uma única letra, *a* ou *b*, indicando em que formato de saída o ficheiro vai ser armazenado, respetivamente ASCII ou binário.

Este comando é ser seguido pelo comando `#end_analysis` que finaliza a lista de comandos a executar.

Os comandos seguintes servem para introduzir as coordenadas das antenas transmissoras (tx) e recetora (rx), assim como o avanço (a cada uma unidade da grelha, o que significa 0.005 m) e a trajetória (linha reta horizontal), respetivamente: **#tx**, **#rx**, **#tx\_steps** e **#rx\_steps**.

#### **#tx: f1 f2 str1 f3 f4**

No comando relativamente ao transmissor, os parâmetros *f1* e *f2* correspondem às coordenadas em metros do transmissor no modelo em *x* e *y*, respetivamente. Neste caso, a antena transmissora está logo acima (5 mm) da camada de betão betuminoso e cerca de 2 cm do bordo. A distância entre tx e rx é constante no caso de antenas blindadas como as que foram utilizadas para estas simulações. Neste caso, a antena de 1600 MHz tem uma distância entre tx e rx de 6 cm. O parâmetro *str1* é o nome de origem que foi especificado no comando `#line_source` (MySource).

O parâmetro *f3* é um atraso na iniciação da fonte de emissão de ondas eletromagnéticas (zero neste caso). O parâmetro *f4* corresponde à remoção da fonte de emissão da onda. Neste caso, todas as simulações este tempo é igual ao parâmetro **#time window**.

Em todas as simulações, este comando é o seguinte: **#tx: 0.02 0.105 MySource 0 6e-9**

#### **#rx: f1 f2**

Os parâmetros *f1* e *f2* correspondem às coordenadas em metros do recetor no modelo em *x* e *y*, respetivamente. Nas simulações, as coordenadas são **#rx: 0.08 0.105**. Note-se aqui a distância de 0.06 m entre as coordenadas em *x* de tx e rx.

#### **#tx\_steps: f1 f2; #rx\_steps: f1 f2**

Os parâmetros *f1* e *f2* são os incrementos, ou passos, em metros das coordenadas *x* e *y* para todos os pontos do transmissor e recetor especificado em tx e rx, respetivamente. Como a

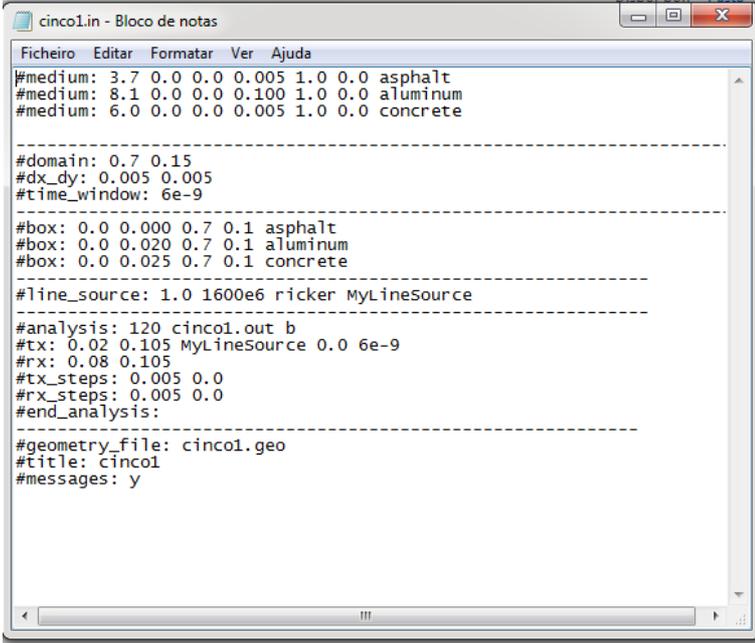
distância entre tx e rx é constante e horizontal, estes parâmetros são escritos da seguinte maneira:

**#tx\_steps: 0.005 0**

**#rx\_steps: 0.005 0**

Finalmente, o último comando de comandos serve para o registo dos dados geométricos da simulação. Com o comando **#geometry\_file** pode-se especificar um ficheiro em que a informação sobre a geometria do modelo é armazenada em formato binário. Esta informação pode ser usada para criar uma imagem do modelo e verificar se foi adequadamente construído. Com o comando **#title** pode-se incluir um título para o modelo. Usando o comando **#messages** pode controlar-se, parcialmente, a quantidade de informação exibida no ecrã em tempo de execução. Escolhendo as opções y (sim) ou n (não), consegue-se ativar ou desativar as mensagens na tela. Esta informação pode ser útil para a verificação de erros durante a execução das simulações.

Na Figura 38 apresenta-se um exemplo do ficheiro feito para o primeiro ensaio à humidade, realizado em laboratório, para a percentagem de 5 % aos cinco minutos, depois de ter sido feita a rega da lajeta com a água.

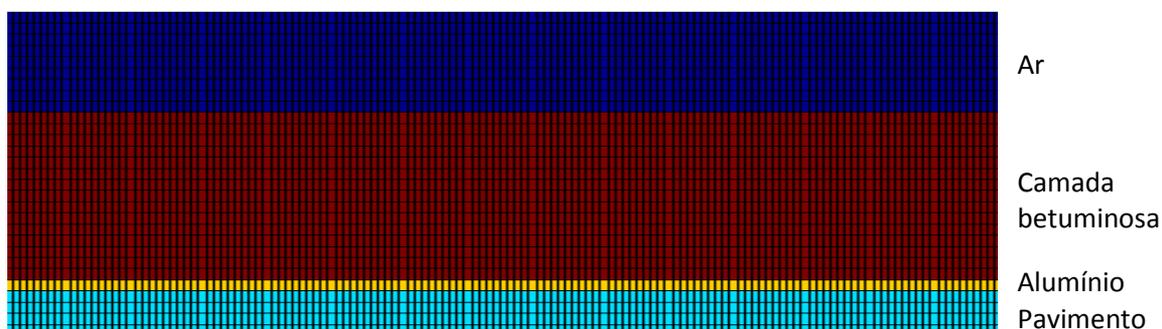


```
Ficheiro Editar Formatar Ver Ajuda
#medium: 3.7 0.0 0.0 0.005 1.0 0.0 asphalt
#medium: 8.1 0.0 0.0 0.100 1.0 0.0 aluminum
#medium: 6.0 0.0 0.0 0.005 1.0 0.0 concrete

-----
#domain: 0.7 0.15
#dx_dy: 0.005 0.005
#time_window: 6e-9
-----
#box: 0.0 0.000 0.7 0.1 asphalt
#box: 0.0 0.020 0.7 0.1 aluminum
#box: 0.0 0.025 0.7 0.1 concrete
-----
#line_source: 1.0 1600e6 ricker MyLineSource
-----
#analysis: 120 cinco1.out b
#tx: 0.02 0.105 MyLineSource 0.0 6e-9
#rx: 0.08 0.105
#tx_steps: 0.005 0.0
#rx_steps: 0.005 0.0
#end_analysis:
-----
#geometry_file: cinco1.geo
#title: cinco1
#messages: y
```

Figura 38 – Ficheiro feito em bloco de notas que é introduzido no programa GprMax2D.

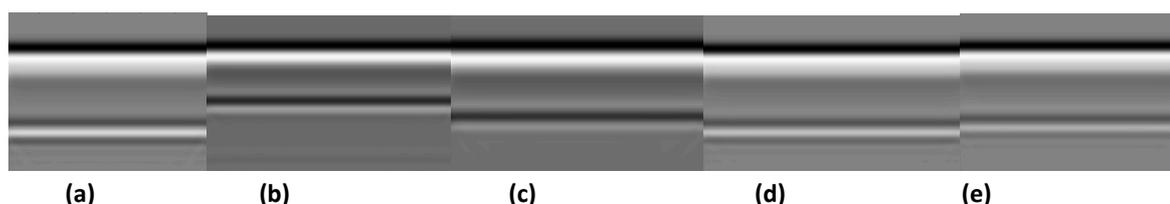
Em anexo está representada a função (em ambiente Matlab) utilizada para obter a informação dos ficheiros criados pela análise numérica. A secção simulada ilustrada na Figura 37 resulta num esquema como o ilustrado na Figura 39.



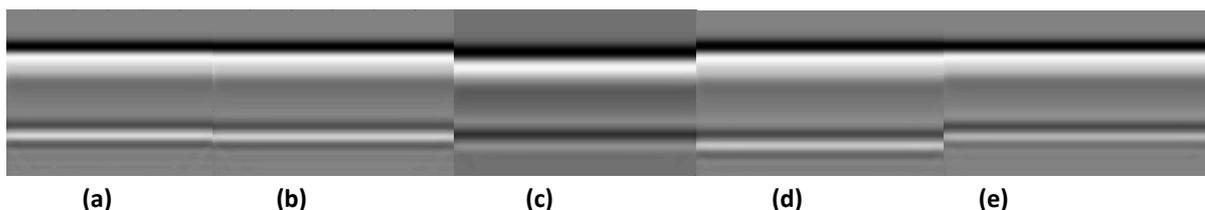
**Figura 39 – Caixa resultante da simulação numérica em Matlab.**

Na análise de dados foram obtidos os resultados para a totalidade dos ensaios à humidade feitos em laboratório. De notar que só foram considerados as diversas percentagens de humidade e não a sua evolução durante 5, 15 e 60 min, conforme os ensaios laboratoriais. Assim, a variação incidirá unicamente no valor da constante dielétrica do pavimento betuminoso. Como só será realizada uma análise por percentagem de humidade e por cada lajeta, serão utilizados os valores constantes na Tabela 5.

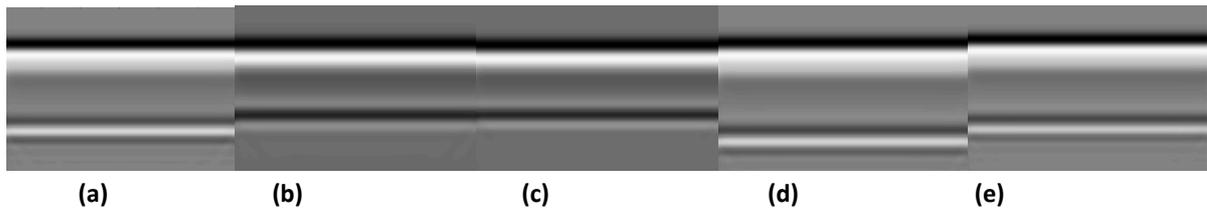
Os resultados das simulações estão ilustrados nos radargramas das Figura 40 e outras iguais mas referentes a outras lajetas.



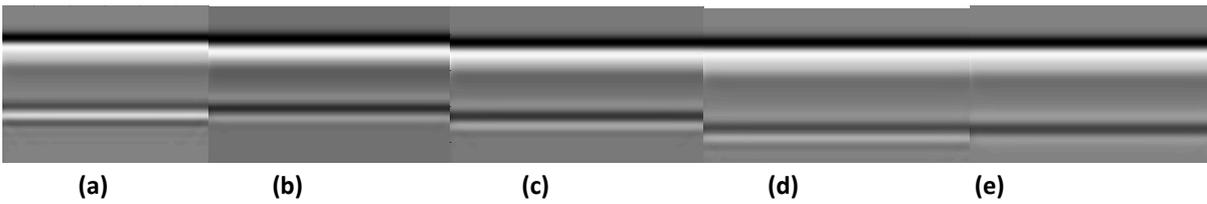
**Figura 40 – Radargramas das simulações da lajeta 1, ilustrando e comparando as situações de lajeta (a) seca, com (b) 5 %, (c) 10 %, (d) 20 % e (e) 40 %de humidade.**



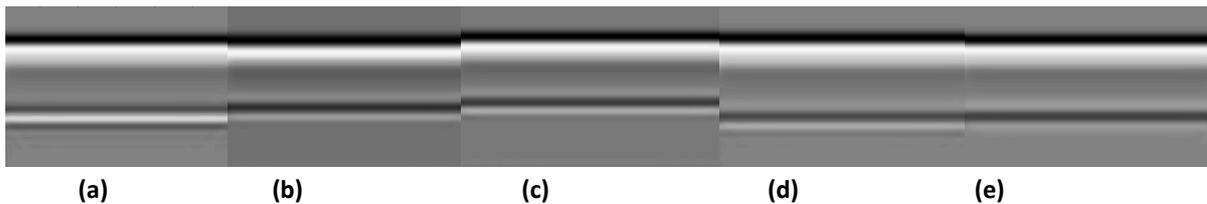
**Figura 41 – Radargramas das simulações da lajeta 2, ilustrando e comparando as situações de lajeta (a) seca, com (b) 5 %, (c) 10 %, (d) 20 % e (e) 40 %de humidade.**



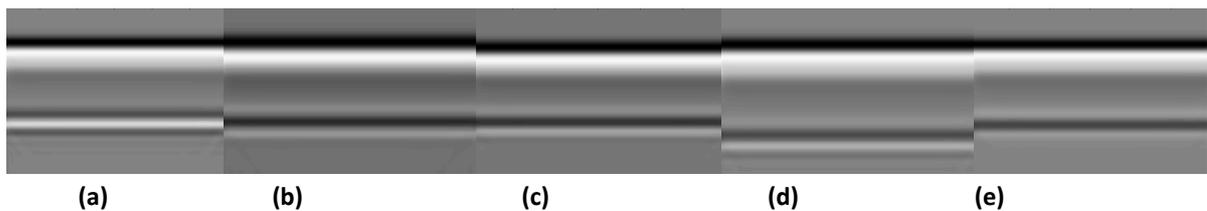
**Figura 42 – Radargramas das simulações da lajeta 3, ilustrando e comparando as situações de lajeta (a) seca, com (b) 5 %, (c) 10 %, (d) 20 % e (e) 40 %de humidade.**



**Figura 43 – Radargramas das simulações da lajeta 4, ilustrando e comparando as situações de lajeta (a) seca, com (b) 5 %, (c) 10 %, (d) 20 % e (e) 40 %de humidade.**

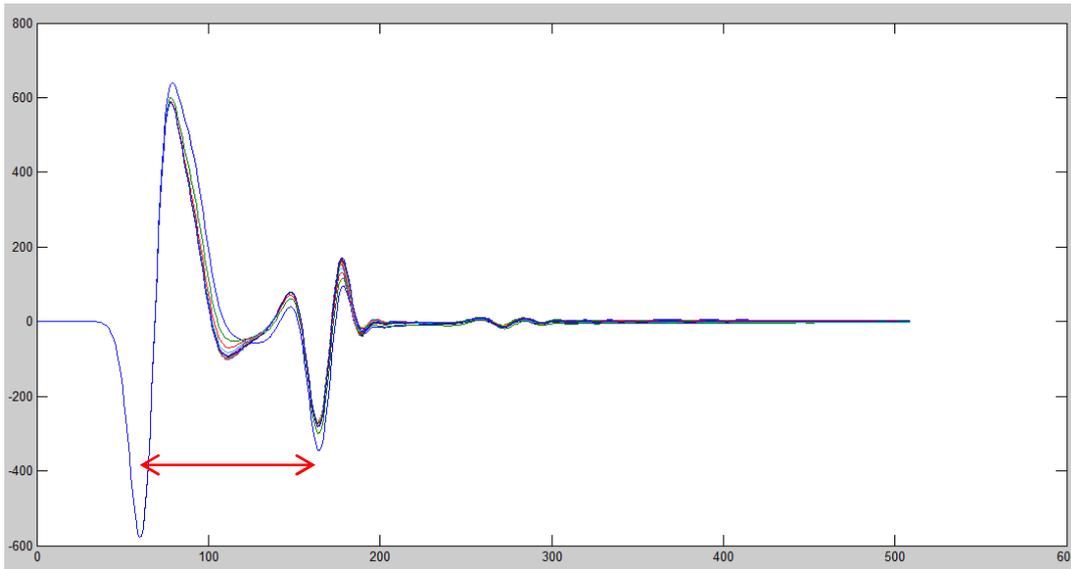


**Figura 44 – Radargramas das simulações da lajeta 5, ilustrando e comparando as situações de lajeta (a) seca, com (b) 5 %, (c) 10 %, (d) 20 % e (e) 40 %de humidade.**



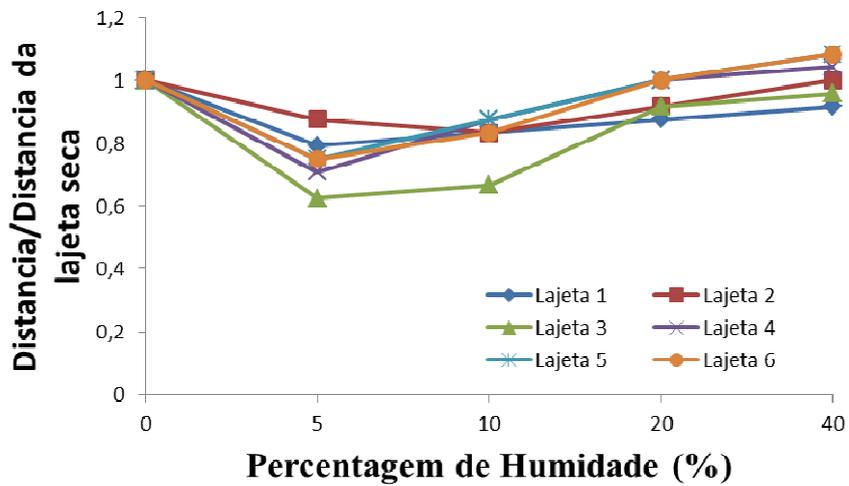
**Figura 45 – Radargramas das simulações da lajeta 6, ilustrando e comparando as situações de lajeta (a) seca, com (b) 5 %, (c) 10 %, (d) 20 % e (e) 40 %de humidade.**

Para confirmar as distâncias da entre a posição da antena e a reflexão do alumínio, mediu-se a diferença entre as amplitudes dadas em Matlab, apresentado na Figura 46.



**Figura 46 - Análise dos resultados em Matlab.**

Observa-se que não existe uma linearidade tão acentuada nos resultados como deveria de existir mas consegue se observar uma tendência nos mesmos, a medida que a percentagem de água vai aumentando a diferença entre as amplitudes também.



**Figura 47 - Gráfico da diferença de amplitudes.**

## 5. CONCLUSÃO

A utilização do GPR na avaliação de pavimentos revela-se distintamente vantajosa, possibilitando um melhor entendimento das suas propriedades, densidades, espessuras e patologias.

Adicionalmente, através de ensaios em laboratório, pode verificar-se todos os resultados obtidos através do GPR.

A detecção de danos (fendas) e estado de conservação (resistência mecânica, humidade) nos pavimentos rodoviários é fundamental. De maneira a diminuir a execução de carotes, e portanto de dano adicional no pavimento, o recurso a técnicas não destrutivas torna-se muito relevante. O georadar é uma técnica muito popular que permite normalmente a detecção das camadas dos pavimentos.

No caso deste trabalho foi utilizado um sistema de georadar com uma antena de alta-frequência (1.6 GHz) com o objetivo de determinar as condições de humidade presentes na camada de betão betuminoso assim como a existência de fendas ou estado fendilhado generalizado. Um conjunto de ensaios laboratoriais que simulou lajes secas e húmidas, assim como fendas em betuminosos permitiu obter uma série de indicadores próximos dos citados na literatura. Foi possível identificar a largura de fendas e esta mostrou uma boa correspondência entre os valores reais e os valores medidos com recurso ao georadar.

De modo a confirmar os valores obtidos experimentalmente, nomeadamente no caso da humidade, realizaram-se uma série de simulações numéricas que permitiram aferir que a metodologia laboratorial não permitiu atingir o pretendido, nomeadamente, o grau de humidade nas lajetas não era o espetável. Essa situação deveu-se, em grande parte, à fuga de água por baixo da lajeta, evaporação e não preenchimento dos poros (porosidade maioritariamente fechada). No entanto, mostram que, aparentemente, é possível, por comparação anterior, atestar da presença de uma maior ou menor taxa de humidade no pavimento betuminoso.

## **5.1. Trabalhos futuros**

O georadar será certamente objeto de estudo de trabalhos posteriores.

Para além de um conjunto de assuntos de significativo interesse que ficaram fora deste trabalho, considera-se que seria importante desenvolver o trabalho laboratorial em termos de deteção de humidade em pavimentos, em condições diferentes das ensaiadas, mesmo em trabalhos de campo, com pavimentos em diferentes extensões das estradas para comparação.

A experiência do presente trabalho, permite considerar que, em termos da deteção de fendilhamento, ainda ficou muito por ensaiar. Seria útil realizar mais inspeções com georadar, em laboratórios, assim como em trabalhos de campo, em locais que, posteriormente, pudessem ser objeto de investigações destrutivas, permitindo a confirmação de resultados.

## 6. BIBLIOGRAFIA

MARDENI, R., ABDULLAH, R. S. A. Raja, *Road Pavement Density Analysis Using a New Non-Destructive Ground Penetrating Radar System*, Faculty of Engineering, Multimedia University, Cyberjaya, Selangor 63100, Malaysia, Faculty of Engineering, Department of Computer and Communication System, Universiti Putra Malaysia, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Universiti Putra Malaysia, 2010.

EDWARDS, Lulu, MASON, Quint, *Evaluation of Nondestructive Methods for Determining Pavement Thickness*, Engineer Research and Development Center, 2011.

AL-QADI, I.L., LAHOUAR S, *Measuring layer thicknesses with GPR – Theory to practice*, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Institut Supérieur des Sciences Appliquées et de Technologie de Sousse, CiteTaffalas, Ibn Khaldoun., 2005.

BENEDETTO, Andrea, Department of Engineering, University Roma Tre, Department of Engineering, University Roma Tre, 2012

BENEDETTO, A., PENSA S., *Indirect diagnosis of pavement structural damages using surface GPR reflection techniques*, Department of Sciences of Civil Engineering, University of Roma Tre, 2006.

DIAMANTI, Nectaria, REDMAN, David, *Field observations and numerical models of GPR response from vertical pavement cracks*, Aristotle University of Thessaloniki, School of Geology, Department of Geophysics, Sensors & Software Inc., 2012.

SAARAENKETO, Timo, *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*, Editor, Harry M. Jol, 2006.

Al-Qadi, Imad L, ZHEN, Leng, LARKIN, Al, *In-Place Hot Mix Asphalt Density Estimation Using Ground Penetrating Radar*, University of Illinois at Urbana-Champaign Advanced Transportation Research and Engineering Laboratory, 2011.

AL-QADI, Imad L., LAHOUAR, Samer, *Use of GPR for Thickness Measurement and Quality Control of Flexible Pavements*, The Charles E. Via Jr. Professor of Civil and Environmental Engineering, Senior Research Associate, Virginia Tech Transportation Institute, 2005.

AL-QADI, I. L., LENG, Z., LAHOUAR, S., BAEK, J., *In-Place Hot-Mix Asphalt Density Estimation Using Ground-Penetrating Radar*, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2008.

KRYSINSKI, Lech, SUDYKA, Jacek, *GPR abilities in investigation of the pavement transversal cracks*, Road and Bridge Research Institute, ul. Instytutowa, Warsaw, Poland, 2013

LOIZOS, Andreas, PLATI, Christina, *Accuracy of pavement thicknesses estimation using different ground penetrating radar analysis approaches*, Laboratory of Highway Engineering, National Technical University of Athens, Department of Transportation Planning and Engineering, 2006.

LORENZO H., RIAL, F.I., PEREIRA, M., SOLLA, M., *A full non-metallic trailer for GPR road surveys*, Department of Natural Resources and Environmental Engineering, University of Vigo, 2011.

LENG, Zhen, AL-QADI, Imad L, LAHOUAR, Samer, *Development and validation for in situ asphalt mixture density prediction models*, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Department of Electronics, Institut Supérieur des Sciences Appliquées et de Technologie de Sousse, 2011.

FERNANDES, Francisco, *NDT in masonry using Ground Penetrating Radar, Parte II*, Universidade do Minho, 2006.

PLATI, Christina, LOIZOS, Andreas, *Estimation of in-situ density and moisture content in HMA pavements based on GPR trace reflection amplitude using different frequencies*, National Technical University of Athens (NTUA), School of Civil Engineering, Laboratory of Highway Engineering, Athens, Greece, 2013.

SAARENKETO, Timo, SCULLION, Tom, *Road evaluation with ground penetrating radar*, Roadscanners Oy, Texas Transportation Institute, Texas A&M University System, College Station, 2000.

SEBESTA, Stephen, SAARENKETO Timo, SCULLION, Tom, *Using Both Infrared and HighSpeed Ground Penetrating Radar for Uniformity Measurements on New HMA Layers*, Texas Transportation Institute, Roadscanners Oy, Texas Transportation Institute, 2012.

SMITH, Stanley S., SCULLION, Thomas, *Development of Ground Penetrating Radar Equipment for Detecting Pavement Condition for Preventive Maintenance*, Geophysical Survey Systems, Texas Transportation Institute, 1993.

COSTA, André, *Utilização do georadar na caracterização de pavimentos rodoviários*, Universidade de Coimbra, 2009.

FARIA, Sandro, *O uso do georadar na determinação de parâmetros da estrutura de pavimentos flexíveis*, Universidade Federal de Viçosa, 2010.

## ANEXOS

### Anexo 1 - Tabelas representativas das amplitudes.

Slab		Wet slabs 5%				
		Amplitude first	File	First signal	Last signal	Amplitude last
Slab 1	5min	12593	1202	1,551568176	2,489087881	20730
	15min	12134	1204	1,867271513	2,797379097	19427
	1h	11699	1215	1,914396264	2,865675126	22498
Slab 2	5min	12381	1203	1,831666042	2,770830771	21491
	15min	12171	1206	1,901219597	2,826326318	21363
	1h	11768	1216	1,901615679	2,826202618	21173
Slab 3	5min	11921	1205	1,876134022	2,817185586	21158
	15min	11917	1207	1,909774606	2,839154208	21160
	1h	11925	1217	1,769555301	2,707596284	21015
Slab 4	5min	13083	1208	1,876132498	2,813014092	21984
	15min	12108	1210	1,910554512	2,844336115	20765
	1h	12557	1218	1,60062157	2,500465161	22196
Slab 5	5min	14556	1209	1,91823	2,81149	24455
	15min	13722	1213	1,913790619	2,813852037	24236
	1h	13533	1219	1,747315117	2,660508105	23021
Slab 6	5min	12718	1211	1,911823485	2,80756082	23214
	15min	12319	1214	1,910630036	2,804493756	22771
	1h	12465	1220	1,577748776	2,481836262	22007

Wet slabs 10%					
File	Amplitude first		First signal	Last signal	Amplitude last
1242	13585	1242	1,715490861	2,654664606	23501
1244	12977	1244	1,827200482	2,788607797	22991
1251	12413	1251	1,86858875	2,844664223	22296
1243	14830	1243	1,836960069	2,78637419	23047
1245	13155	1245	1,867490732	2,804259153	22788
1253	12344	1253	1,841262283	2,78212996	22594
1246	12683	1246	1,869014182	2,809963635	22510
1247	12630	1247	1,870159053	2,824544498	22324
1256	12301	1256	1,905758845	2,838539678	20663
1248	14016	1248	1,880739829	2,804658636	21417
1249	12657	1249	1,867417	2,783024095	22037
1257	12318	1257	1,90381662	2,817374383	20821
1250	17520	1250	1,952153549	2,853254148	21328
1254	13989	1254	1,874519363	2,79151173	23201
1258	13399	1258	1,797240854	2,703650817	23699
1252	13273	1252	1,790703457	2,711156285	21527
1255	12870	1255	1,876057524	2,794738886	22853
1260	12217	1260	1,894242324	2,801234252	22740

Wet slabs 20%					
File	Amplitude first		First signal	Last signal	Amplitude last
1261	12499	1261	1,796739433	2,847133875	18154
1263	11797	1263	1,809585048	2,832683535	18631
1269	12642	1269	1,867341077	2,829369383	19713
1262	11496	1262	1,879424417	2,931985776	16796
1264	14654	1264	1,870090596	2,863819307	20490
1272	13275	1272	1,866325844	2,824800788	21714
1265	15254	1265	1,886540618	2,868405234	21925
1266	14345	1266	1,871659535	2,842509899	21843
1276	12527	1276	1,871752462	2,83709554	20507
1267	13482	1267	1,856808051	2,786649232	21454
1270	12713	1270	1,865573706	2,784646138	21371
1277	12259	1277	1,870267197	2,791412092	21542
1268	14648	1268	1,88033014	2,791248285	22072
1273	13191	1273	1,863022057	2,760341415	23115
1278	12355	1278	1,897875887	2,788452582	22896
1271	12808	1271	1,868239217	2,779858835	22464
1275	12646	1275	1,86726699	2,777986007	21353
1280	12295	1280	1,832704916	2,74492629	22256

Wet slabs 40%					
File	Amplitude first		First signal	Last signal	Amplitude last
1281	14612	1281	1,928051299	2,9003794	21491
1285	13195	1285	1,951625885	2,913397122	21113
1296	12582	1296	1,9540528	2,905862117	20896
1282	16646	1282	1,971831502	2,9408498	20763
1286	14285	1286	1,953679074	2,905442785	22697
1297	13103	1297	1,953898317	2,907967913	21868
1284	16004	1284	1,997100919	2,981650274	20862
1287	14582	1287	1,967549896	2,937448254	21853
1299	12381	1299	1,955038569	2,897026348	20841
1290	12824	1290	1,947237598	2,871942415	21802
1291	12509	1291	1,944852887	2,868106228	21648
1300	12202	1300	1,947168888	2,859389902	22036
1292	16403	1292	2,007269747	2,911842501	21102
1295	12276	1295	1,929757629	2,830220426	22694
1302	12026	1302	1,83488548	2,72974516	23651
1293	13200	1293	1,953747087	2,86875175	22064
1298	12015	1298	1,923044594	2,86946796	21441
1303	12003	1303	1,917948901	2,834724012	22046

**Anexo 2 - Tabelas para o cálculo da velocidade.**

Slab	Wet Slabs 5% - 5min					
	two way travel time		Amplitude first	Amplitude last	Ratio amplitudes	Velocity
Slab 1	0,938		12593	20730	0,61	14,933
Slab 2	0,939		12381	21491	0,58	14,907
Slab 3	0,941		11921	21158	0,56	14,877
Slab 4	0,937		13083	21984	0,60	14,943
Slab 5	0,893		14556	24455	0,60	15,673
Slab 6	0,896		12718	23214	0,55	15,630

Wet Slabs 5% - 15min					
two way travel time		Amplitude first	Amplitude last	Ratio amplitudes	Velocity
0,930		12134	22929	0,53	15,052
0,925		12171	21363	0,57	15,133
0,929		11917	21160	0,56	15,064
0,934		12108	20765	0,58	14,993
0,900		13722	24236	0,57	15,554
0,894		12319	22771	0,54	15,662

Wet Slabs 5% - 1h					
two way travel time		Amplitude first	Amplitude last	Ratio amplitudes	Velocity
0,951		11699	22498	0,52	14,717
0,925		11768	21173	0,56	15,142
0,938		11925	21015	0,57	14,925
0,900		12557	22196	0,57	15,558
0,913		13533	23021	0,59	15,331
0,904		12465	22007	0,57	15,485

Wet Slabs 10% - 5min					
two way travel time		Amplitude first	Amplitude last	Ratio amplitudes	Velocity
0,939		13585	23501	0,58	14,907
0,949		14830	23047	0,64	14,746
0,941		12683	22510	0,56	14,879
0,924		14016	21417	0,65	15,153
0,901		17520	21328	0,82	15,537
0,920		13273	21527	0,62	15,210

Wet Slabs 10% - 15min					
two way travel time		Amplitude first	Amplitude last	Ratio amplitudes	Velocity
0,961		12977	22991	0,56	14,562
0,937		13155	22788	0,58	14,945
0,954		12630	22324	0,57	14,669
0,916		12657	22037	0,57	15,290
0,917		13989	23201	0,60	15,267
0,919		12870	22853	0,56	15,239

Wet Slabs 10% - 1h					
two way travel time		Amplitude first	Amplitude last	Ratio amplitudes	Velocity
0,976		12413	22296	0,56	14,343
0,941		12344	22594	0,55	14,880
0,933		12301	20663	0,60	15,009
0,914		12318	20821	0,59	15,325
0,906		13399	23699	0,57	15,446
0,907		12217	22740	0,54	15,436

Wet Slabs 20% - 5min					
two way travel time		Amplitude first	Amplitude last	Ratio amplitudes	Velocity
1,050		12499	18154	0,69	13,328
1,053		11496	16796	0,68	13,301
0,982		15254	21925	0,70	14,259
0,930		13482	21454	0,63	15,056
0,911		14648	22072	0,66	15,369
0,912		12808	22464	0,57	15,357

Wet Slabs 20% - 15min					
two way travel time		Amplitude first	Amplitude last	Ratio amplitudes	Velocity
1,023		11797	18631	0,63	13,684
0,994		14654	20490	0,72	14,088
0,971		14345	21843	0,66	14,420
0,919		12713	21371	0,59	15,233
0,897		13191	23115	0,57	15,602
0,911		12646	21353	0,59	15,372

Wet Slabs 20% - 1h					
two way travel time		Amplitude first	Amplitude last	Ratio amplitudes	Velocity
0,962		12642	19713	0,64	14,553
0,958		13275	21714	0,61	14,607
0,965		12527	20507	0,61	14,503
0,921		12259	21542	0,57	15,198
0,891		12355	22896	0,54	15,720
0,912		12295	22256	0,55	15,347

Wet Slabs 40% - 5min					
two way travel time		Amplitude first	Amplitude last	Ratio amplitudes	Velocity
0,972		14612	21491	0,68	14,398
0,969		16646	20763	0,80	14,448
0,985		16004	20862	0,77	14,220
0,925		12824	21802	0,59	15,140
0,905		16403	21102	0,78	15,477
0,915		13200	22064	0,60	15,300

Wet Slabs 40% - 15min						
	two way travel time		Amplitude first	Amplitude last	Ratio amplitudes	Velocity
	0,962		13195	21113	0,62	14,556
	0,952		14285	22697	0,63	14,710
	0,970		14582	21853	0,67	14,435
	0,923		12509	21648	0,58	15,164
	0,900		12276	22694	0,54	15,548
	0,946		12015	21441	0,56	14,793

Wet Slabs 40% - 1h						
	two way travel time		Amplitude first	Amplitude last	Ratio amplitudes	Velocity
	0,952		12582	20896	0,60	14,709
	0,954		13103	21868	0,60	14,674
	0,942		12381	20841	0,59	14,862
	0,912		12202	22036	0,55	15,347
	0,895		12026	23651	0,51	15,645
	0,917		12003	22046	0,54	15,271

**Anexo 3 - Tabelas para o cálculo da constante dielétrica**

	Wet Slabs 5% - 15min			
	Amplitude first	Amplitude last	Ratio amplitudes	$\epsilon_a$
Slab 1	12134	19427	0,62	4,33
Slab 2	12171	21363	0,57	3,65
Slab 3	11917	21160	0,56	3,58
Slab 4	12108	20765	0,58	3,80
Slab 5	13722	24236	0,57	3,61
Slab 6	12319	22771	0,54	3,36

	Wet Slabs 5% - 1h			
	Amplitude first	Amplitude last	Ratio amplitudes	$\epsilon_a$
Slab 1	11699	22498	0,52	3,17
Slab 2	11768	21173	0,56	3,50
Slab 3	11925	21015	0,57	3,62
Slab 4	12557	22196	0,57	3,61
Slab 5	13533	23021	0,59	3,85
Slab 6	12465	22007	0,57	3,61

	Wet Slabs 10% - 5min			
	Amplitude first	Amplitude last	Ratio amplitudes	$\epsilon_a$
Slab 1	13585	23501	0,58	3,74
Slab 2	14830	23047	0,64	4,61
Slab 3	12683	22510	0,56	3,58
Slab 4	14016	21417	0,65	4,79
Slab 5	17520	21328	0,82	10,20
Slab 6	13273	21527	0,62	4,22

	Wet Slabs 10% - 15min			
	Amplitude first	Amplitude last	Ratio amplitudes	$\epsilon_a$
Slab 1	12977	22991	0,56	3,59
Slab 2	13155	22788	0,58	3,73
Slab 3	12630	22324	0,57	3,61
Slab 4	12657	22037	0,57	3,70
Slab 5	13989	23201	0,60	4,04
Slab 6	12870	22853	0,56	3,58

	Wet Slabs 10% - 1h			
	Amplitude first	Amplitude last	Ratio amplitudes	$\epsilon_a$
Slab 1	12413	22296	0,56	3,51
Slab 2	12344	22594	0,55	3,41
Slab 3	12301	20663	0,60	3,94
Slab 4	12318	20821	0,59	3,90
Slab 5	13399	23699	0,57	3,60
Slab 6	12217	22740	0,54	3,32

Wet Slabs 20% - 5min				
	Amplitude first	Amplitude last	Ratio amplitudes	$\epsilon a$
Slab 1	12499	18154	0,69	5,42
Slab 2	11496	16796	0,68	5,34
Slab 3	15254	21925	0,70	5,57
Slab 4	13482	21454	0,63	4,38
Slab 5	14648	22072	0,66	4,95
Slab 6	12808	22464	0,57	3,65

Wet Slabs 20% - 15min				
	Amplitude first	Amplitude last	Ratio amplitudes	$\epsilon a$
Slab 1	11797	18631	0,63	4,45
Slab 2	14654	20490	0,72	6,02
Slab 3	14345	21843	0,66	4,83
Slab 4	12713	21371	0,59	3,94
Slab 5	13191	23115	0,57	3,66
Slab 6	12646	21353	0,59	3,90

Wet Slabs 20% - 1h				
	Amplitude first	Amplitude last	Ratio amplitudes	$\epsilon a$
Slab 1	12642	19713	0,64	2,56
Slab 2	13275	21714	0,61	2,64
Slab 3	12527	20507	0,61	2,64
Slab 4	12259	21542	0,57	2,76
Slab 5	12355	22896	0,54	2,85
Slab 6	12295	22256	0,55	2,81

Wet Slabs 40% - 5min				
	Amplitude first	Amplitude last	Ratio amplitudes	$\epsilon a$
Slab 1	14612	21491	0,68	5,25
Slab 2	16646	20763	0,80	9,09
Slab 3	16004	20862	0,77	7,59
Slab 4	12824	21802	0,59	3,86
Slab 5	16403	21102	0,78	7,98
Slab 6	13200	22064	0,60	3,98

Wet Slabs 40% - 15min				
	Amplitude first	Amplitude last	Ratio amplitudes	$\epsilon a$
Slab 1	13195	21113	0,62	4,33
Slab 2	14285	22697	0,63	4,40
Slab 3	14582	21853	0,67	5,01
Slab 4	12509	21648	0,58	3,74
Slab 5	12276	22694	0,54	3,36
Slab 6	12015	21441	0,56	3,55

	Wet Slabs 40% - 15min			
	Amplitude first	Amplitude last	Ratio amplitudes	$\epsilon a$
Slab 1	12582	20896	0,60	4,03
Slab 2	13103	21868	0,60	3,99
Slab 3	12381	20841	0,59	3,93
Slab 4	12202	22036	0,55	3,48
Slab 5	12026	23651	0,51	3,07
Slab 6	12003	22046	0,54	3,39

**Anexo 4 - Tabela para o cálculo das distâncias.**

	D/D(seco)				
	Lajeta1	1	0,791667	0,833333	0,875
Lajeta2	1	0,875	0,833333	0,916667	1
Lajeta3	1	0,625	0,666667	0,916667	0,958333
Lajeta4	1	0,708333	0,875	1	1,041667
Lajeta5	1	0,75	0,875	1	1,083333
Lajeta6	1	0,75	0,833333	1	1,083333

**Anexo 5 - Função Matlab utilizada para a obtenção dos resultados dos ficheiros gerados pela GprMax2D.**

```
Editor - C:\Users\Windows7\Documents\MATLAB\ao0_all.m
EDITOR PUBLISH VIEW
New Open Save Find Files Compare Print Comment Indent Insert % % % Go To Find Breakpoints Run Run and Time Run and Advance Run Section Advance
FILE EDIT NAVIGATE BREAKPOINTS RUN
ao0_all.m x
1 - [geometria, info_geo, materiales]=gprmax2g('cinco2.geo');
2 - [info, dados]=gprmax('cinco2.out');
3 - for i=1:509
4 -     for j=1:120
5 -         resultados_ez(i,j)=dados.ez(i,j);
6 -         resultados_hx(i,j)=dados.hx(i,j);
7 -         resultados_hy(i,j)=dados.hy(i,j);
8 -     end
9 - end
10
11 - distancia_horizontal=info_geo.nx*info_geo.dx
12 - distancia_vertical=info_geo.ny*info_geo.dy
13 - time_window=info.removed*1000000000
14
15 - figure;
16 - imagesc([0 700],[0 150],geometria); % data from geometry
17
18 - figure;
19 - imagesc(resultados_ez); % data from electric field
20 - colormap gray; % colours: grey (classic)
21
22 - % formats the colorbar
23 - h = colorbar('location', 'EastOutside'); % shows colorbar on the right
24 - ylabel(h,'Amplitude [Volts]'); %label colorbar (vertical)
25
26 - % titles of figure and axes
27 - title('Radargram - field ez') % title label
28 - xlabel('Distance [m]') % x-axis label
29 - ylabel('Two-Way Travel Time [ns]') % y-axis label
```