

CARACTERIZAÇÃO DA FUNDAÇÃO DE INFRA-ESTRUTURAS DE TRANSPORTE COM RECURSO AO GEORADAR

Identificação das Camadas de Apoio

MÁRIO JORGE NOGUEIRA PEDROSA

Relatório de Projecto submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA

Orientador: Professor Doutor Eduardo Manuel Cabrita Fortunato

Co-Orientador: Professora Doutora Simona Fontul

JUNHO DE 2009

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2008/2009

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2008/2009 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

À Ana

Poucas vezes quem ganha o que não merece, agradece o que ganha

Francisco Quevedo

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho de dissertação foi elaborado na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), sob a orientação do Professor Doutor Eduardo Manuel Cabrita Fortunato e co-orientação da Professora Doutora Simona Fontul.

Todo o equipamento utilizado na realização deste trabalho, assim como o espaço onde foram realizados os ensaios laboratoriais, foram gentilmente cedidos pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil, entidade à qual o autor gostaria de agradecer, na pessoa do Investigador Auxiliar Eduardo Fortunato.

O autor gostaria ainda de agradecer ao Professor Doutor Eduardo Fortunato a sugestão do tema de investigação, bem como o interesse e a disponibilidade constantes, apesar da distância, demonstrados durante a orientação.

Agradeço à Professora Doutora Simona Fontul os ensinamentos e a disponibilidade para co-orientar este trabalho e para acompanhar os ensaios desenvolvidos quer em campo quer em laboratório.

Agradeço ao Técnico Superior Rui Miguel Ribeiro Coelho pela sua colaboração nos ensaios de campo e de laboratório, sempre com empenho e dedicação.

À REFER pela autorização para a publicação de dados do Projecto e de resultados.

À Fundação para a Ciência e Tecnologia que apoiou financeiramente este trabalho, no âmbito do projecto PTDC/ECM/70571/2006 – “Optimização de vias ferroviárias de alta velocidade mediante o uso de sub-balastro betuminoso”.

O meu último agradecimento é para a Ana, pelo apoio incondicional e paciência sem limites e, sobretudo, pelo que sacrificou em prol deste trabalho.

RESUMO

A caracterização da fundação de infra-estruturas ferroviárias é um processo de vital importância no contexto da manutenção e reabilitação destas. Recorrendo a um vasto leque de técnicas de ensaio, o objectivo deste processo é avaliar o desempenho da subestrutura, identificando zonas degradadas da via e indicando medidas apropriadas de manutenção.

Neste contexto, o georadar tem sido apontado como uma ferramenta com enorme potencial, tendo adquirido grande relevância nos últimos anos. Assim, esta dissertação pretende contribuir para a optimização da aplicação deste método na caracterização da subestrutura de ferrovias.

Descrevem-se, sucintamente, as principais aplicações técnicas, os princípios de funcionamento e a metodologia de ensaio do georadar. Juntamente com uma breve revisão bibliográfica sobre a aplicação do método a infra-estruturas ferroviárias, estes elementos servirão de base para um aprofundamento dos conhecimentos relativos à técnica do georadar.

Desenvolveram-se ensaios num troço de ferrovia inserido na Linha do Sul e estudos laboratoriais num trecho experimental, procurando avaliar a eficácia deste método na identificação das camadas de apoio de infra-estruturas ferroviárias.

Por fim, analisam-se os resultados obtidos e apresentam-se algumas considerações quanto aos mesmos, terminando com a apresentação de propostas para desenvolvimento futuro da aplicação do método a infra-estruturas ferroviárias.

PALAVRAS-CHAVE: GEORADAR, FUNDAÇÃO DE INFRA-ESTRUTURAS DE TRANSPORTE, ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS.

ABSTRACT

Railway tracks' foundation's characterization is a procedure of the utmost importance in the terms of its maintenance and rehabilitation. Resorting to a great deal of surveying techniques, the aim of this process is the evaluation of the substructure's performance, recognizing poor track quality areas and pointing out appropriate remedial schemes.

In what concerns to this, Ground Penetrating Radar has been deemed as a quite promising tool, having been granted huge relevance throughout the last few years. As so, this dissertation intends to help improving this method's application onto railway tracks' substructure's characterization.

Briefly, the main technical applications, the working principles and GPR's surveying methodology are described. Allied with a short literature review on the method's application onto railway tracks' infrastructure, this information will provide the required support for deepening the knowledge concerning GPR's technique.

Field tests in a railway section of the *Linha do Sul* track and laboratory tests in a controlled test section have been developed, in order to evaluate this method's efficiency on recognizing the subgrade of railway infrastructure.

At last, the obtained data is analyzed giving place to some final remarks, concluding with suggestions for future developments on the matter of the application of this method to railway tracks.

KEYWORDS: GROUND PENETRATING RADAR, FOUNDATION OF RAILWAY TRACKS, NON DESTRUCTIVE TECHNIQUES.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO DO TRABALHO	1
1.2. OBJECTIVOS DO TRABALHO	3
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	3
2. DESCRIÇÃO DO GEORADAR	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. APLICAÇÕES DO GEORADAR	8
2.3. PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DO GEORADAR	11
2.3.1. TEORIA DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS	11
2.3.2. EQUAÇÕES BÁSICAS USADAS	14
2.3.3. PROPAGAÇÃO DA ONDA NO MEIO	15
2.3.4. CÁLCULO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO SINAL	17
2.4. EQUIPAMENTO E ACESSÓRIOS	20
2.5. PROCEDIMENTO DE ENSAIO	23
2.5.1. PREPARAÇÃO DO ENSAIO	23
2.5.2. CONDUÇÃO DO ENSAIO	25
2.6. PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS	28
2.6.1. PRÉ-PROCESSAMENTO	28
2.6.2. PROCESSAMENTO	28
2.6.3. INTERPRETAÇÃO E VISUALIZAÇÃO	30
3. APLICAÇÃO DO GEORADAR A INFRA-ESTRUTURAS FERROVIÁRIAS	33
3.1. INTRODUÇÃO	33
3.2. ESTADO DA ARTE	34
3.2.1. THE FINNISH GEOTECHNICAL SOCIETY [10]	35

3.2.2. JACK, JACKSON [17].....	35
3.2.3. SUSSMANN [1]	36
3.2.4. HUGENSCHMIDT [18]	39
3.2.5. OLHOEFT, SELIG [19]	40
3.2.6. BROUGH <i>ET AL.</i> [20]	41
3.2.7. HYSLIP <i>ET AL.</i> [21]	42
3.2.8. CARPENTER <i>ET AL</i> [22].	43
3.2.9. HUGENSCHMIDT [23]	45
3.2.10. FORTUNATO [5].....	46
3.2.11. ROBERTS <i>ET AL.</i> [24] E ROBERTS <i>ET AL.</i> [25]	49
3.2.12. LOIZOS, PLATI [26].....	51
3.2.13. MALA [27].....	52

4. RESULTADOS DE ENSAIOS NUM CASO DE ESTUDO..... 53

4.1. INTRODUÇÃO	53
4.2. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO	54
4.3. PROCEDIMENTOS DE ENSAIO E EQUIPAMENTO UTILIZADO	56
4.4. ENSAIOS LABORATORIAIS.....	58
4.5. ENSAIOS REALIZADOS <i>IN SITU</i>	61
4.5.1. RESULTADOS OBTIDOS COM ANTENAS DE 1 GHZ	61
4.5.2. RESULTADOS OBTIDOS COM ANTENAS DE 2 GHZ	67

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS..... 69

5.1. PRINCIPAIS CONCLUSÕES.....	69
5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	71

BIBLIOGRAFIA..... 73

ANEXO I..... 77

ANEXO II..... 79

ANEXO III..... 81

ANEXO IV..... 85

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Princípio de funcionamento do georadar.	6
Fig. 2.2 – Estado da aplicação do georadar a infra-estruturas de transporte na Europa.	7
Fig. 2.3 – Casos de aplicação do georadar.....	8
Fig. 2.4 – Resultados experimentais com radar com furo de sondagem.....	10
Fig. 2.5 – Equipamento do radar com furo de sondagem.....	10
Fig. 2.6 – Efeito da porosidade na constante dielétrica.	13
Fig. 2.7 – Efeito do teor em água na constante dielétrica para diversas granulometrias.	13
Fig. 2.8 – Alguns exemplos de reflexões causadas por interfaces comuns.	15
Fig. 2.9 – Fenómeno de refração.	16
Fig. 2.10 – Geometria usual de colocação do georadar na via férrea.	17
Fig. 2.11 – O método do Ponto de Profundidade Comum.....	18
Fig. 2.12 – Determinação da velocidade a partir de um alvo pontual.....	18
Fig. 2.13 – Representação esquemática do método WARR.	19
Fig. 2.14 – Método de Estimação da Amplitude para cálculo da velocidade.....	19
Fig. 2.15 – Método de Antenas Múltiplas na Superfície.....	20
Fig. 2.16 – A) unidade de armazenamento e visualização; B) unidade de transmissão e recepção. ...	20
Fig. 2.17 – Vários sistemas com antenas em contacto com a superfície.	21
Fig. 2.18 – Vários sistemas com antenas suspensas.	22
Fig. 2.19 – Dispositivo de controlo do intervalo de amostragem.	23
Fig. 2.20 – Realização de um teste de desempenho a uma antena de 1 GHz.	24
Fig. 2.21 – “Marcação” de elementos no perfil.....	25
Fig. 2.22 – Procedimentos típicos de calibração.	27
Fig. 2.23 – Exemplo do processo de formação de um múltiplo.	29
Fig. 3.1 – Equipamento de georadar em uso.....	36
Fig. 3.2 – Secção de 200 m de resultados obtidos com o georadar.....	40
Fig. 3.3 – Índice de estado do subsolo, baseado nos resultados do georadar.....	43
Fig. 3.4 – Radargrama obtido num troço de via onde foi instalado o PW5.....	45
Fig. 3.5 – Interpretação de imagens de radar obtidas numa zona do trecho experimental.....	48
Fig. 3.6 – Aspecto do veículo construído para deslocar as antenas.	48
Fig. 3.7 – Perfil de radar numa zona de transição da via antiga para a via renovada.....	49
Fig. 3.8 – Comparação entre os resultados obtidos, para a mesma secção, com antenas de 2 GHz (topo) e 1 GHz (em baixo).....	50

Fig. 3.9 – Comparação entre as espessuras estimadas com a informação obtida nas sondagens.....	51
Fig. 3.10 – Em cima, os resultados de georadar para uma secção da via. Em baixo, a interpretação feita com base nestes resultados.	52
Fig. 4.1 – Perfil do tratamento da plataforma entre o km 3+000 e o km 4+000.....	55
Fig. 4.2 – Sistema de posicionamento das antenas durante o ensaio.....	56
Fig. 4.3 – Exemplo de um ficheiro de calibração para as antenas de 2 GHz.	57
Fig. 4.4 – Registos obtidos na mesma secção para janelas de visualização de: a) 20 ns; b) 30 ns	58
Fig. 4.5 – Execução do trecho experimental.	59
Fig. 4.6 – Onda reflectida na placa metálica subjacente ao material em análise.	59
Fig. 4.7 – Processamento dos resultados laboratoriais.	60
Fig. 4.8 – Interpretação automática inicial dos resultados obtidos com as antenas de 1 GHz, entre o km 3+775 e o km 3+825.	61
Fig. 4.9 – Interpretação automática inicial dos resultados obtidos com as antenas de 1 GHz, entre o km 3+350 e o km 3+550.	62
Fig. 4.10 – Interpretação do perfil no km 3+325; medições feitas com as antenas de 1 GHz e uma densidade de amostragem de 20 leituras por metro.	63
Fig. 4.11 – Interpretação do perfil no km 3+325; medições feitas com as antenas de 1 GHz e uma densidade de amostragem de 50 leituras por metro.	63
Fig. 4.12 – Resultados obtidos com o radar no km 3+325, após calibração das velocidades de onda obtidas em trecho experimental, na zona com sub-balastro granítico (esquerda) e na zona com sub-balastro granítico e calcário (direita).....	64
Fig. 4.13 – Interpretação de resultados ao km 3+500; medições feitas com as antenas de 1 GHz e uma densidade de amostragem de 20 leituras por metro.	64
Fig. 4.14 – Interpretação do perfil numa extensão de 50 m entre o km 3+650 e o km 3+950; medições feitas com as antenas de 1 GHz e uma densidade de amostragem de 20 leituras por metro.	65
Fig. 4.15 – Interpretação do perfil na zona de transição ao km 3+950; medições feitas com as antenas de 1 GHz e uma densidade de amostragem de 50 leituras por metro.....	66
Fig. 4.16 – Interpretação de resultados ao km 3+325 na zona com sub-balastro granítico (esquerda) e na zona com sub-balastro granítico e calcário (direita); medições feitas com as antenas de 2 GHz e uma densidade de amostragem de 5 leituras por metro.....	67

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Parâmetros do SIR-20 para recolha de dados com o BallastVue	27
Tabela 3.1 – Características dos locais estudados.....	39
Tabela 3.2 – Constante dieléctrica dos materiais ensaiados.....	47
Tabela 3.3 – Resumo das áreas investigadas e da informação recolhida no local.....	50
Tabela 4.1 – Alguns dos requisitos mínimos de Projecto relativos às camadas estruturais da plataforma.....	54
Tabela 4.2 – Valores laboratoriais de velocidade de propagação, espessura e valor dieléctrico	61
Tabela I.1 – Propriedades eléctricas e velocidade de propagação da onda para alguns materiais	77
Tabela I.2 – Efeito de alguns materiais na propagação das ondas para a frequência de 1 GHz	78
Tabela II.1 – Simbologia para distinção de interfaces entre camadas	79
Tabela II.2 – Simbologia para distinção de objectos no sub-solo.....	79
Tabela III.1 – Principais modos de rotura da via associados a defeitos na sub-estrutura.....	81
Tabela III.2 – Ensaio recomendado para ferrovias que requerem acesso intermitente ao local	82
Tabela III.3 - Ensaio recomendado para ferrovias que requerem acesso mais demorado ao local..	83
Tabela IV.1 – Fuso granulométrico e características do material a aplicar na camada de coroamento (elementos cedidos pela REFER)	85
Tabela IV.2 – Comparação dos valores obtidos em laboratório relativos aos ABGE provenientes das pedreiras Sobrissul e Mota-Engil (elementos cedidos pela REFER).....	86

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

σ – condutividade eléctrica [S/m]

ϵ – permissividade dieléctrica relativa [adimensional]

k – coeficiente de reflexão [adimensional]

R – coeficiente de penetração [adimensional]

A – atenuação da onda num meio [dB/m]

λ – comprimento de onda [m]

f – frequência de emissão da onda [Hz]

z_s – profundidade de penetração da onda [m]

w – teor em água [%]

END – Ensaios Não Destrutivos

IEM – Impulso ElectroMagnético

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

GSSI – Geophysical Survey Systems Inc.

UWB – Ultra Wide Band

WARR – Wide Angle Reflection and Ranging

GPS – Global Positioning System

FWD – Falling Weight Deflectometer

FIR – Finite Impulse Response

IIR – Infinite Impulse Response

UMass – University of Massachusetts Amherst

DP – Penetrómetro Dinâmico

CP – Cone Penetrométrico

ABS – Automatic Ballast Sampler

REFER – Rede Ferroviária Nacional

UIC – Union Internationale des Chemins de Fer

ABGE – Agregado Britado de Granulometria Extensa

PSA – Parte Superior do Aterro

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO DO TRABALHO

Actualmente, e após algumas décadas de declínio, as infra-estruturas ferroviárias desempenham um papel vital nas nossas vidas. Para muitas empresas, o transporte ferroviário é o meio de transporte terrestre preferencial para os seus equipamentos e mercadorias pela boa relação qualidade – preço (vantagem sobre o transporte aéreo). De forma idêntica, os comboios começam a fazer parte do quotidiano de cada vez mais pessoas, quer no foro profissional, quer no social (lazer, férias, etc.).

Esta tendência, acentuada nos últimos anos, traduz-se em maiores exigências ao nível da estrutura. O transporte de mercadorias impõe cargas por eixo mais elevadas à superestrutura, enquanto o transporte de passageiros requer níveis elevados de comodidade, segurança, frequência e rapidez.

Face à necessidade de utilizar, simultaneamente, a mesma infra-estrutura para o transporte de mercadorias e de passageiros, as ferrovias são, actualmente, um enorme desafio de engenharia. Um desafio acrescido pelo facto de, muitas vezes, haver necessidade de renovar a infra-estrutura existente.

Tendo em vista obter estruturas que exibam um elevado desempenho, minimizando o risco potencial destas nas pessoas e no meio ambiente, é necessário desenvolver processos de garantia da qualidade, que imponham procedimentos adequados nas diversas fases da vida das obras, nomeadamente durante a concepção, a construção e a operação.

Nesse âmbito, os ensaios de conformidade levados a cabo durante a construção e os ensaios de caracterização da estrutura e monitorização do seu comportamento, realizados ao longo da sua vida, desempenham um papel fundamental.

No que à subestrutura da via férrea se refere, existem vários ensaios que são normalmente realizados, os quais permitem medir diversos parâmetros de caracterização dos materiais e das camadas que a compõem. Fruto da sua simplicidade, rapidez, *know-how* e custo, os ensaios clássicos são os mais utilizados. Durante a operação, nomeadamente, é usual medir a geometria da via e proceder a inspecções periódicas ao nível da superestrutura. Ensaios envolvendo a subestrutura são realizados apenas em situações excepcionais, após se verificar a existência de anomalias.

Contudo, no âmbito da engenharia ferroviária, nota-se uma preocupação crescente em proceder também ao acompanhamento regular da subestrutura, de forma a prever eventuais defeitos que possam pôr em causa a regular exploração da estrutura e cujo desenvolvimento pode conduzir a trabalhos de manutenção de grande vulto, longos e dispendiosos.

Neste contexto, e procurando anular as limitações dos ensaios clássicos, surgem os ensaios não destrutivos (END). Como o nome sugere, estes métodos provocam pouco ou nenhum dano na estrutura (alguns destes simulam condições de serviço na estrutura, provocando cargas semelhantes aos da sua utilização). Sendo métodos não invasivos, podem ser realizados com a estrutura em utilização, embora a sua maior vantagem resida no facto de, em algumas circunstâncias, permitirem que os defeitos sejam identificados numa fase inicial do seu desenvolvimento.

Referem-se, a título de exemplo, como técnicas de ensaio não destrutivas: 1) raio-X; 2) ultra-sons; 3) métodos electromagnéticos; 4) emissão acústica; 5) infra-vermelhos; 6) laser; 7) ressonância magnética; 8) métodos esclerométricos; 9) ensaios de carga.

Os END têm vindo a ganhar influência no meio técnico de, praticamente, todas as áreas da engenharia. Nas infra-estruturas de transporte, em particular, o potencial destes métodos é enorme, atendendo a que se tratam de estruturas com grande desenvolvimento linear.

De entre estes métodos, o georadar oferece a possibilidade de realizar o ensaio de forma rápida e contínua, fornecendo informações sobre as camadas da subestrutura. Através do georadar é possível determinar as espessuras das várias camadas, assim como estimar as condições destas (posição do nível freático, grau de contaminação, etc.).

O georadar tem sido cada vez mais utilizado na avaliação das condições de ferrovias, principalmente na Europa e nos EUA, estando a sua aplicação neste contexto largamente documentada, embora ainda em fase de expansão [1].

O georadar é um método electromagnético de ensaio, que tira partido de uma banda de frequências de rádio para investigação do subsolo. O princípio de funcionamento do georadar baseia-se na transmissão de um curto impulso electromagnético (IEM ou *ElectroMagnetic Pulse – EMP*) ao material. Através de fenómenos de refacção, reflexão e difracção, este impulso será modificado pelo meio. Finalmente, a energia reflectida é captada pelo georadar e o sinal é exibido e armazenado num computador.

Embora os primeiros registos da aplicação do georadar às rodovias datem do início da década de 70 [2], só na década seguinte começaram a surgir relatos relacionados com a sua utilização em ferrovias [3].

Nas quase três décadas passadas desde a primeira publicação na área, o desenvolvimento do georadar aplicado às ferrovias tem sido lento. Este facto deve-se, principalmente, às características intrínsecas à via, que limitam a operacionalidade do equipamento (existência de obstáculos, como os aparelhos de mudança de via) e dificultam a interpretação dos resultados (elementos como as travessas e os carris).

Em Portugal, o georadar é ainda pouco utilizado na avaliação, em contínuo, de infra-estruturas de transporte. Até muito recentemente, apenas o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) possuía equipamento de ensaio adequado, pelo que os poucos ensaios realizados eram da sua responsabilidade.

Atendendo a que muitas das linhas de caminhos-de-ferro portuguesas têm sido alvo de recuperação ou remodelação e que os processos de conservação são, cada vez mais, determinantes na qualidade de qualquer estrutura, os temas abordados neste trabalho são, no entender do autor, uma contribuição útil no âmbito da engenharia geotécnica aplicada às infra-estruturas ferroviárias.

1.2. OBJECTIVOS DO TRABALHO

Este trabalho tem como tema a caracterização da fundação de infra-estruturas de transporte com recurso ao equipamento de georadar. Incidirá, principalmente, na identificação das camadas de apoio da via férrea, nomeadamente o balastro, o sub-balastro e o coroamento.

Pretende-se abordar o tema de um ponto de vista prático, sob a perspectiva do utilizador. Deste modo, os conceitos teóricos são tratados pouco exaustivamente, sendo mencionados apenas com o propósito de facilitar a interpretação dos resultados. Desta forma, o presente texto pretende contribuir para a optimização do uso de técnicas não destrutivas na caracterização das camadas de apoio de infra-estruturas de transporte, com principal relevo para as ferrovias.

No decorrer do trabalho, será apresentado e analisado um caso de estudo, com o propósito de aprofundar os conhecimentos relativos à técnica de georadar.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta introdução procura contextualizar o uso do georadar em infra-estruturas ferroviárias e apresentar os principais objectivos do trabalho.

No segundo capítulo, após uma breve contextualização histórica, será feita uma referência aos princípios de funcionamento do método do georadar. Em seguida, mencionam-se o equipamento e os acessórios que compõem o georadar e, por último, será descrito o procedimento de ensaio, com alusão às principais fases deste (preparação do equipamento, recolha dos dados e processamento e interpretação dos resultados).

No terceiro capítulo será abordada a aplicação do georadar às infra-estruturas de transporte ferroviário. Serão analisados artigos e outras referências publicadas sobre o assunto, referindo as principais conclusões e limitações observadas.

No quarto capítulo, relata-se a aplicação do método num caso de estudo na Linha do Sul. Após uma breve descrição deste, referem-se os procedimentos de ensaio adoptados. Em seguida relatam-se os ensaios laboratoriais realizados, num trecho experimental, bem como os resultados obtidos. Posteriormente, referem-se os ensaios conduzidos no terreno e analisam-se os dados recolhidos.

Finalmente, no quinto capítulo, é feito um resumo do trabalho realizado, referindo as principais conclusões retiradas e apresentando as perspectivas do autor relativas ao desenvolvimento futuro nesta área.

2

DESCRIÇÃO DO GEORADAR

2.1. INTRODUÇÃO

Radar, acrónimo de *RADio Detection And Ranging*, designa o método electromagnético que, através de frequências rádio, detecta objectos e determina a distância a que estes se encontram da fonte emissora, a partir do “eco” que estes reflectem [4].

A primeira utilização conhecida deste método na prospecção geofísica data de 1929, na Áustria. O objectivo do ensaio era determinar a profundidade de um glaciar [5].

Contudo, foi com fins militares que esta tecnologia começou a ser usada de forma sistemática, na detecção de aviões. Durante os anos 50, a força aérea norte-americana servia-se dos radares para determinar a distância dos aviões ao gelo, evitando que estes se despenhassem. Só no final da década de 60 foi concebido e desenvolvido um radar para penetrar o subsolo. Este seria utilizado na identificação de túneis pouco profundos, durante a Guerra do Vietname.

Em 1970 viria a ser criada a primeira companhia de manufacturação de georadar com fins comerciais, a GSSI – *Geophysical Survey Systems Inc.*, a qual seria patenteada quatro anos mais tarde [6]. Desde então, têm surgido inúmeras publicações abrangendo todos os domínios de aplicação do georadar. No caso concreto da aplicação em obras de Engenharia Civil, destaca-se o uso frequente deste método nas rodovias, desde meados da década de 70 [4].

No entanto, o primeiro registo do uso do georadar em infra-estruturas ferroviárias data de 1982, na Suécia, coincidindo com o aparecimento de aparelhos com maiores frequências [5]. De resto, é na Europa que o recurso ao georadar nas ferrovias é mais frequente, sendo que nos EUA são ainda poucas as referências a casos de aplicação existentes.

O Georadar, ou Radar de Penetração, é um método electromagnético de prospecção geofísica. Na bibliografia em inglês, o georadar é normalmente designado por *Ground Penetrating Radar (GPR)*, embora outras designações possam surgir, tais como *Ground Probing Radar*, *Subsurface Radar* ou *Electromagnetic Reflection Method*.

O seu princípio de funcionamento baseia-se na geração e transmissão de ondas electromagnéticas de curta duração ao meio, através de uma antena. Estas, ao propagarem-se pelo meio, sofrerão fenómenos de reflexão, refacção e difracção nos interfaces eléctricos. A percentagem da onda reflectida é captada pelo equipamento, o qual permite o armazenamento e a visualização dos dados sobre a forma de um perfil; a restante atravessa a interface, continuando a propagar-se pelo meio até encontrar uma nova camada, repetindo-se o processo – ver Figura 2.1.

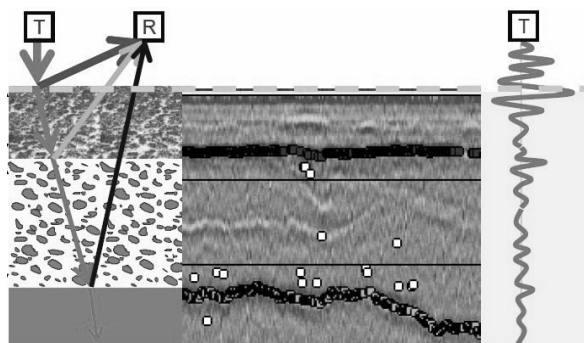


Fig.2.1 – Princípio de funcionamento do georadar. T representa a antena emissora e R a antena receptora. À esquerda descreve-se o princípio de propagação das ondas nas camadas, ao centro apresenta-se o aspecto final de um ficheiro de resultados e à direita o aspecto da onda sinusoidal obtida (adaptado de [6]).

Além de permitir traçar um perfil contínuo do local, este é um método relativamente rápido de implementar (pela portabilidade e pela possibilidade de realização a velocidades elevadas). Estas duas características fazem do georadar uma técnica vantajosa na investigação de infra-estruturas de transporte, não só pela qualidade dos resultados, como também pelo facto de dispensar o corte temporário da via ao tráfego (que se traduz numa redução considerável dos custos totais do ensaio).

A principal limitação do método prende-se com a dificuldade na interpretação dos perfis. Embora a localização de singularidades no perfil não seja um problema, estas poderão ser causadas por diversos factores, pelo que a experiência e bom senso do operador são determinantes para a credibilidade dos resultados.

Outras dificuldades associadas ao uso do georadar são [7]:

- Inexistência de especificações quanto à recolha e processamento dos dados e interpretação dos resultados;
- Falta de técnicos com experiência no manuseio do equipamento e na interpretação dos resultados;
- Pouca experiência acumulada no meio técnico.

Embora algumas destas dificuldades se resolvam com a realização de mais ensaios, outras estão relacionadas com limitações no equipamento, nas tecnologias disponíveis ou nas propriedades electromagnéticas dos materiais. Estas, associadas à dificuldade de automatização do processo, têm contribuído para o lento desenvolvimento do georadar.

Em relação aos métodos de prospecção sísmicos, o georadar tem um menor poder de penetração. Em condições favoráveis do subsolo, será possível atingir os 30 m de profundidade, embora a resolução da imagem possa ficar comprometida. Para as aplicações comuns, a baixas profundidades, a resolução das imagens é da ordem dos centímetros [5].

Apesar de ser uma técnica que vem sendo aplicada em infra-estruturas de transporte há quase 40 anos, em 2006 [7], Saarenketo atentava para a fraca aceitação do georadar em alguns países da Europa (incluindo Portugal). Conquanto ao resto do continente e em contraste com a situação anterior, o autor apontava, para determinados países, o frequente recurso ao método e, para outros, o uso crescente do mesmo – Figura 2.2.



Fig.2.2 – Estado da aplicação do georadar a infra-estruturas de transporte na Europa. Nos países referenciados a negro, o uso deste em projecto é rotineiro; a cinzento, estão os países onde a aplicação do método tem aumentado; marcados a branco, encontram-se os países onde o uso do georadar é disperso e/ou associado a investigação (adaptado de [7]).

Actualmente, existem diversas companhias patenteadas de venda de equipamentos ou serviços relacionados com o georadar. Entre elas importa referir, pelo seu peso no mercado, as norte-americanas *GSSI*, *Pulse Radar* (Pulse Radar Inc.) e *Penetradar* (Penetradar Corporation), a canadiana *Sensoft* (Sensors & Software Inc.), a sueca *Malå* (Malå Geoscience) e a italiana *IDS* (Ingegneria dei Sistemi).

2.2. APLICAÇÕES DO GEORADAR

Desde o início, o georadar tem sido utilizado com vários propósitos, em todo o tipo de investigações. As suas aplicações dividem-se em dois grandes grupos: 1) detecção e análise de elementos isolados no subsolo, tais como condutas ou cabos eléctricos; 2) obtenção de um perfil contínuo do terreno, em particular das camadas mais superficiais – Figura 2.3.

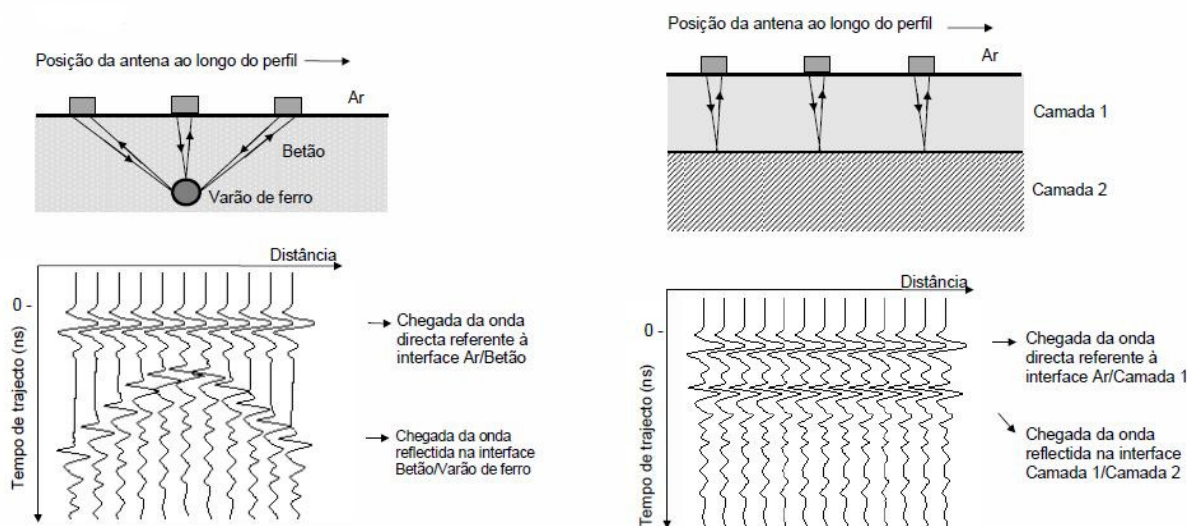


Fig.2.3 – Casos de aplicação do georadar. À esquerda, a detecção de objectos no subsolo; à direita, um perfil contínuo das camadas superficiais do terreno traçado pelo georadar (adaptado de [5]).

Referem-se, neste ponto, os diversos campos de aplicação do georadar, com o intuito de evidenciar as potencialidades do equipamento:

- **Arqueologia e Ciência Forense** – nestas áreas, é vital que a detecção e/ou extracção do objecto sejam realizadas provocando o mínimo impacto neste; o georadar permite que as escavações se tornem mais eficazes e rápidas, garantindo que a estas não sejam aleatórias e que o objecto permaneça intacto [8];
- **Astronomia** – o georadar é um equipamento extremamente sensível ao metal; por outro lado, o vácuo é o meio mais propício à propagação das ondas electromagnéticas; como tal, este método tornou-se uma ferramenta útil para astrónomos: na localização de asteróides e cometas, para investigação no subsolo da Lua, de Marte e de Europa (satélite de Júpiter) e na análise da Ionosfera (camada superior da atmosfera que, devido à sua composição, é reflectora de ondas de rádio) [9];
- **Batimetria de rios e lagos** – a água fresca, pelo baixo teor em minerais e pela homogeneidade, é um meio para o qual o georadar é muito eficaz, produzindo resultados nítidos até profundidades consideráveis (cerca de 20 m); neste contexto, o georadar vem sendo usado para averiguar a navegabilidade de canais, planear a construção de estruturas no sistema e fornecer informações sobre a quantidade e qualidade dos sedimentos no leito; outras aplicações mais pontuais têm sido referidas, como investigação da população piscícola [10];
- **Determinação da espessura de gelo** – o georadar é um método muito preciso de avaliação da espessura de gelo; contudo, a interpretação pode ser dificultada pela existência de uma camada de água sobre ou no interior do gelo; outra aplicação particular é a localização de zonas de formação de gelo nos rios (*frazil ice*) [10];

- **Engenharia Civil** – neste âmbito, o georadar tem tido uma aceitação crescente; existe actualmente um vasto leque de aplicações, das quais se destacam:
 - **Estruturas de betão armado** – através deste método, é possível localizar os varões de aço na estrutura e determinar a espessura do recobrimento das armaduras [8];
 - **Infra-estruturas de transporte** – nesta categoria incluem-se ferrovias, rodovias e aeroportos; o georadar é uma técnica muito útil em investigações nestas estruturas, nomeadamente na determinação da espessura das diversas camadas (pavimento, base, sub-base, balastro, sub-balastro e plataforma) e na localização de vazios no interior da subestrutura [10];
 - **Pontes** – as pontes são estruturas muito sensíveis e, como tal, alvo de manutenção mais apertada; o georadar é um aparelho que permite identificar várias causas de defeitos nestas estruturas, tais como fissuração do pavimento no tabuleiro, má compactação nos aterros de aproximação à ponte e arrastamento de areias nas fundações, provocado pela corrente do rio (*scour*) [8] [9];
 - **Engenharia Municipal** – uma aplicação muito comum do georadar é a localização de cabos ou condutas de água no subsolo; neste contexto, é possível mapear os sistemas de abastecimento de água, esgotos e gás natural, facilitando os trabalhos de escavação e realização de fundações em zonas urbanas; este método pode igualmente ser usado na identificação de fugas nas condutas de água [3] [10];
- **Estratigrafia de solos** – as investigações do solo e das suas propriedades são uma necessidade corrente para o planeamento de zonas urbanas, a construção de infra-estruturas de transporte, a agricultura e a silvicultura; o georadar é um método prático, rápido, contínuo e eficaz de obter a estratigrafia de um terreno, bem como a natureza das várias camadas identificadas; através do georadar, consegue-se igualmente avaliar a posição do nível freático e a sua evolução no tempo [10];
- **Estudos ambientais** – no âmbito deste trabalho, os estudos ambientais referem-se à determinação e monitorização de zonas contaminadas do subsolo; na maioria dos casos em que se tem recorrido ao georadar, a contaminação é causada por fugas de óleo ou petróleo (em condutas e tanques); nos últimos anos, com a construção de aterros de resíduos, o georadar tem sido aplicado na localização de possíveis locais de depósito e na manutenção de outros existentes [10];
- **Estudos em água subterrânea** – a água subterrânea é um recurso natural cada vez mais importante e, por isso, os requisitos de utilização e qualidade desta têm aumentado; geralmente, os cursos de água subterrâneos atravessam terrenos arenosos, meios propícios ao georadar, permitindo profundidades de penetração da ordem dos 30 m; além de permitir identificar cursos de água subterrâneos, o georadar possibilita a avaliação da condição da água nestes, fornecendo informação quanto à potabilidade desta [10];
- **Perfil do *bedrock*** – o interface entre o *bedrock* e a camada superior é, em muitos casos, imediato, sendo muito simples interpretar esta interface num perfil de georadar assim como avaliar a sua qualidade (existência de falhas, por exemplo); no entanto, em horizontes rochosos profundos ou na presença de argilas, o método pode ser inviável [10];
- **Topografia** – o ar é um meio favorável à propagação de ondas electromagnéticas, além de electricamente contrastante com a superfície terrestre; assim, o georadar tem sido utilizado em levantamentos topográficos, com resultados satisfatórios; para fazer o levantamento de uma região, acopla-se o georadar à fuselagem de um helicóptero, sobrevoando-se a zona a baixa altitude e velocidade moderada [10].

Mais recentemente, surgiram relatos da aplicação do georadar em furos de sondagem (*borehole radar*). De todas as técnicas de prospecção geofísica, esta proporciona a melhor resolução espacial e em profundidade, para horizontes rochosos [11]. Colocando o georadar no interior de um furo, no subsolo, obtém-se informação a vários metros de distância, em todas as direcções. Em relação ao ensaio sísmico entre furos (*cross-hole*), esta técnica abrange um maior volume de terreno [12]. Na Figura 2.4 apresenta-se uma imagem obtida através deste método.

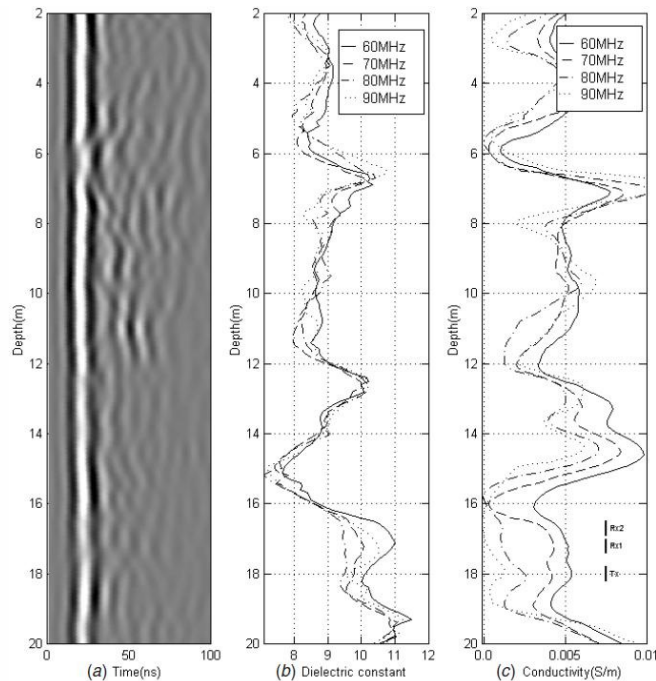


Fig.2.4 – Resultados experimentais com radar com furo de sondagem; a) é o perfil obtido com o radar; b) e c) são, respectivamente, as estimativas do valor dieléctrico e da condutividade [12].

Actualmente, a companhia sueca Malå fornece equipamento compatível com esta técnica: a unidade de controlo ProEx (que substituiu o anterior RAMAC/GPR), conjugada com antenas *Slimhole* de 100 MHz ou antenas de 250 MHz – Figura 2.5. A empresa realça que, com este equipamento, conseguiram realizar medições com sucesso a mais de 1500 m [8].

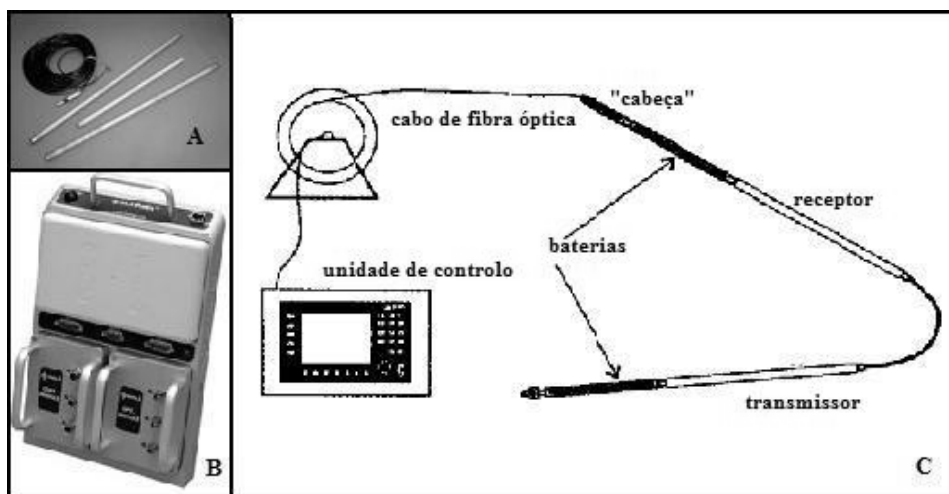


Fig.2.5 – Equipamento do radar com furo de sondagem; A) apresenta as antenas e os cabos de fibra óptica [8]; B) mostra a unidade de controlo [8]; C) é um esquema do equipamento montado [11].

2.3. PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DO GEORADAR

2.3.1. TEORIA DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Sendo um método de prospecção electromagnético, os fundamentos teóricos do georadar provêm da Teoria de Ondas Electromagnéticas e da Geometria Óptica. Segundo Ulriksen [3], a primeira é suficiente para explicar a maioria das situações, sendo que apenas é necessário recorrer à Geometria Óptica quando o comprimento da onda é significativamente mais baixo que a dimensão do objecto ou quando o material puder ser considerado isolante.

O georadar transmite a um meio curtos impulsos numa banda larga de frequências rádio (UWB – *Ultra Wide Band*), num processo similar ao do radar convencional. No interior desse meio, as ondas serão modificadas antes de serem captadas pelo equipamento. As principais alterações, causadas pelos materiais que compõem o meio, dependem, principalmente, de três propriedades electromagnéticas destes: 1) susceptibilidade magnética; 2) condutividade eléctrica; 3) constante dieléctrica.

A susceptibilidade magnética de um material, também denominada de permeabilidade magnética, traduz o magnetismo deste. Como tal, esta propriedade está directamente relacionada com a presença de metais no material, sendo mais significativa naqueles com elevado teor metálico. Em teoria, apenas o vácuo pode ser considerado um meio livre de magnetismo, ou “transparente”. Na prática, é comum assumir, para a maioria dos materiais utilizados nas fundações das infra-estruturas de transporte, que a sua susceptibilidade é igual à do vácuo. Embora seja admissível considerar os materiais da subestrutura como não magnéticos, a permeabilidade magnética é um fenómeno que não deve ser ignorado nas ferrovias, devido à existência de elementos metálicos como os carris.

A condutividade eléctrica define a capacidade do material para conduzir uma corrente eléctrica. Por outras palavras, traduz o grau de liberdade dos electrões e iões no seu interior quando excitados por um campo magnético. Todos os materiais são condutores, podendo ser agrupados numa de três categorias:

- **Condutores** – nesta categoria incluem-se os materiais de condutividade elevada ($\sigma > 10^5$ mho/m) como os metais; nestes, o efeito de atenuação das ondas é tão marcante que se consideram reflectores perfeitos, “opacos” à energia electromagnética;
- **Isolantes ou Dieléctricos** – o vácuo é o único meio que pode ser considerado condutor perfeito ou “transparente”, já que não se verifica qualquer perda de energia no seu interior; contudo, nesta categoria também se incluem os materiais de muito baixa condutividade ($\sigma < 10^{-7}$ mho/m), como o ar, uma vez que é desprezável a perda que neles se verifica;
- **Semi-condutores** – todos aqueles cuja condutividade é significativa, mas não elevada; nesta categoria inserem-se praticamente todos os materiais.

Quando uma onda se propaga num determinado meio, a condutividade eléctrica dos materiais que o compõem irá controlar a profundidade de penetração do sinal (quanto maior a condutividade, maior a perda de energia e absorção do sinal). Caso o sinal encontre um material condutor, a condutividade deste ditará a reflexão da onda.

Os materiais geológicos utilizados na subestrutura de uma ferrovia são meios multifásicos compostos. Como tal, o mesmo material poderá exibir vários valores de condutividade, dependendo do seu teor em água, da sua condição ou da presença de sais. No entanto, para simplificação dos cálculos, é prática comum considerar os materiais geológicos dieléctricos, admitindo que a sua baixa condutividade é desprezável.

A propriedade electromagnética com maior relevo é a constante dielétrica, também designada de valor dielétrico ou permissividade dielétrica relativa. Esta grandeza é definida pela razão entre a permissividade absoluta do material, ϵ_m , e a do vácuo, $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{12}$ F/m (Farad por metro), pelo que se trata de uma medida adimensional.

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_m}{\epsilon_0} \quad (1)$$

A constante dielétrica relaciona a velocidade de propagação da onda no meio, v , com a velocidade da luz no vácuo, $c = 3 \times 10^8$ m/s. Nos meios transparentes, a velocidade de propagação da onda é igual à do vácuo, pelo que a sua permissividade dielétrica é 1. A água, por seu turno, apresenta $\epsilon_r = 81$.

$$\epsilon_r = \left(\frac{c}{v} \right)^2 \quad (2)$$

A permissividade absoluta, e consequentemente a relativa, é influenciada pelo carácter multifásico do material. Em geral, o valor dielétrico de um solo varia entre 3 e 40 [5] (ver Anexo I), sendo que os valores mais baixos correspondem às areias secas ou à maioria das rochas (índice de vazios significativo e sem água) e os valores mais elevados a argilas e areias saturadas. Tanto a condutividade eléctrica como a constante dielétrica são dependentes da frequência, pelo que, muitas vezes, são expressas como números complexos.

$$\epsilon = \epsilon' - i\epsilon'' \quad (3)$$

$$\sigma = \sigma' - i\sigma'' \quad (4)$$

Estudos conduzidos por Lundien mostram que, para valores da frequência superiores a 1 GHz, esta parece não ter qualquer efeito no valor dielétrico, mas que, para frequências baixas (abaixo dos 400 MHz), a constante dielétrica diminui bruscamente com o aumento da frequência. Sussmann [1] conclui que, para frequências inferiores a 200 MHz, o aumento da frequência conduz ao aumento da condutividade.

Okrasinski estudou o efeito de características do material, como a porosidade e o teor em água, na constante dielétrica [1]. Os resultados são apresentados nas Figuras 2.6 e 2.7. Atente-se no facto de o efeito do teor em água na constante dielétrica ser significativo [3].

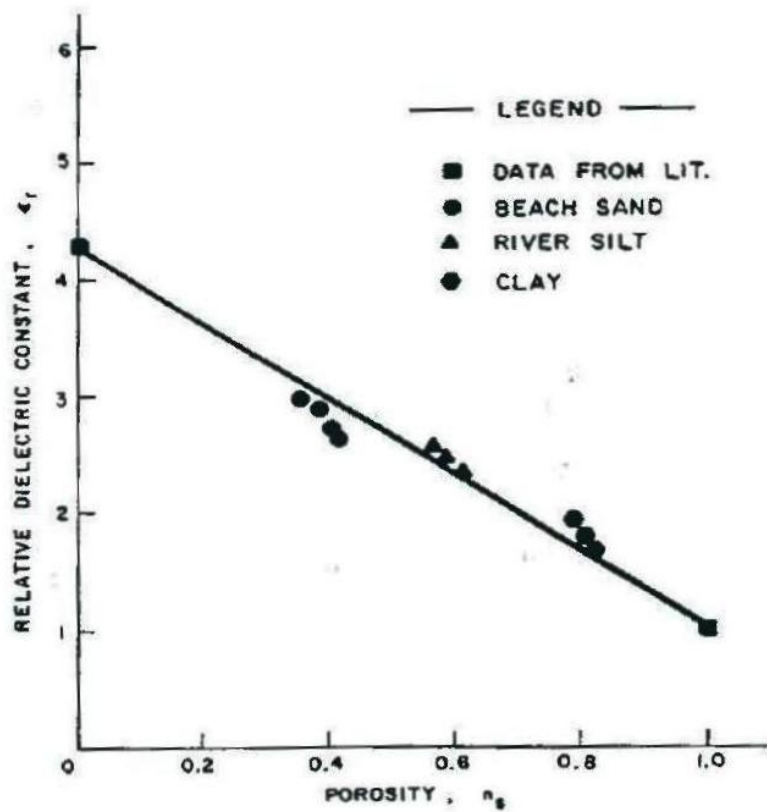


Fig.2.6 – Efeito da porosidade na constante dielétrica (adaptado de [1]).

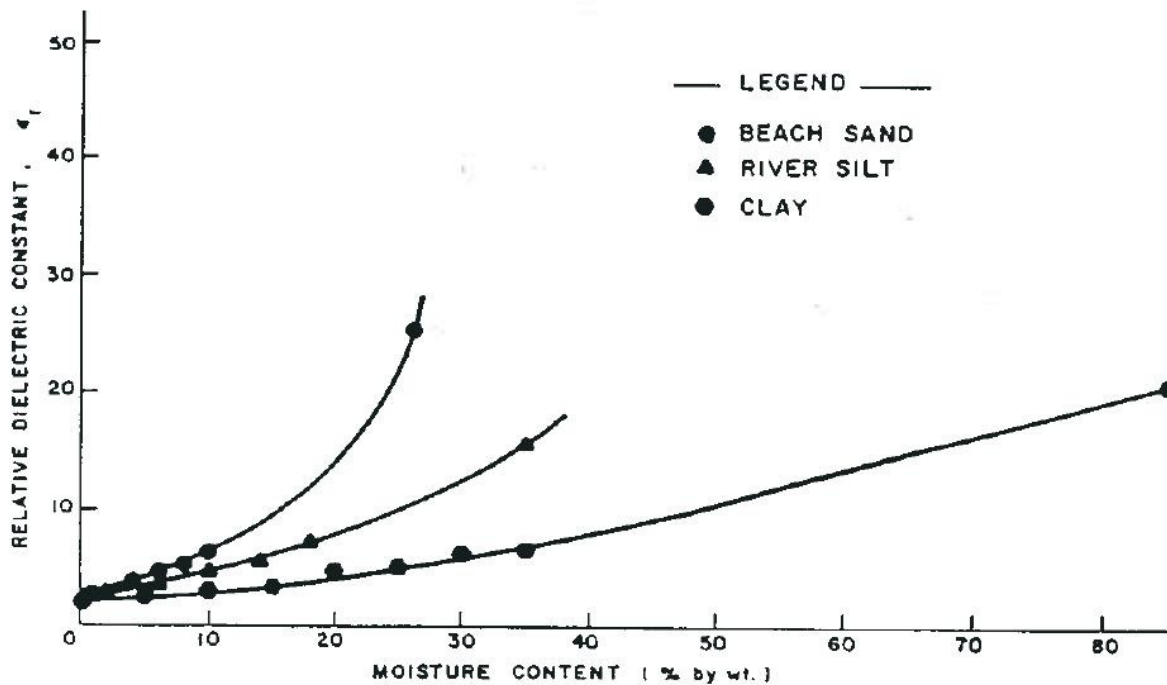


Fig.2.7 – Efeito do teor em água na constante dielétrica para diversas granulometrias. Os pontos representados com círculos correspondem a areias; os simbolizados com triângulos correspondem a siltes e os hexagonais referem-se a argilas (adaptado de [1]).

2.3.2. EQUAÇÕES BÁSICAS USADAS

Um dos objectivos de uma investigação com o georadar em infra-estruturas de transporte é a medição das espessuras das camadas. Visto que, durante o intervalo de tempo decorrido desde a emissão da onda até à sua recepção, t (em segundos), a onda percorre duas vezes o mesmo percurso, a relação entre a profundidade da interface, s (em metros), e a respectiva velocidade de propagação da onda no meio, v (em metros por segundo), é expressa por:

$$s = \frac{v \times t}{2} \quad (5)$$

Resolvendo (2) em função da velocidade de propagação da onda no meio, obtemos:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (6)$$

Dada a elevada velocidade de propagação das ondas, é corrente apresentar v em metros por nanossegundo (m/ns).

Como foi referido anteriormente, ao nível da interface, uma percentagem da onda é reflectida, enquanto a restante se propaga, penetrando a interface. Sendo ϵ_1 o valor dieléctrico da camada superior do interface e ϵ_2 o valor dieléctrico da camada inferior, o coeficiente de reflexão, k , é obtido por (7) e o coeficiente de penetração, R , por (8).

$$k = \frac{\sqrt{\epsilon_2} - \sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1}} \quad (7)$$

$$R = 1 - k \quad (8)$$

Como se mencionou em 2.3.1., a condutividade controla a profundidade de penetração da onda. Sendo σ a condutividade de uma dada camada (em Siemens por metro), a atenuação A (em decibel por metro) é obtida por:

$$A = \frac{1635\sigma}{\epsilon_r} \quad (9)$$

O comprimento de onda, λ (em cm), é função da velocidade de propagação da onda no vácuo, c , da frequência de emissão do georadar, f (em Hertz), e do valor dieléctrico da camada:

$$\lambda = \frac{100 \times c}{f \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \quad (10)$$

A profundidade de penetração da onda no meio não é facilmente mensurável. Como tal, é normal definir-se esta como sendo a profundidade à qual a onda já foi atenuada de $1/e$ (em que e representa o número de Nepper; $1/e \approx 37\%$). Admitindo que o meio tem fraca susceptibilidade magnética, a profundidade de penetração, z_s (em metros), é obtida por:

$$z_s = \frac{503.8}{\sqrt{\sigma \cdot f}} \quad (11)$$

Embora não corresponda ao valor exacto, esta expressão traduz, para os objectivos deste trabalho, uma estimativa razoável do alcance do equipamento.

O material mais comum nas camadas de balastro e sub-balastro de uma ferrovia é o granito. Para este, o valor dieléctrico é cerca de 5 e a condutividade eléctrica varia entre 0,01 e 1 mS/m. Os valores da velocidade de propagação das ondas e da atenuação neste meio estão tabeladas no Anexo I. Um valor comum da frequência do georadar num ensaio em ferrovia é de 1 GHz. Para esta, o comprimento de onda no granito é cerca de 13 cm e a profundidade de penetração poderá atingir, teoricamente, os 5 m. Note-se que a profundidade de penetração é tanto maior quanto menor for a frequência do sinal. Assim, para a detecção de uma interface a uma profundidade superior, seria necessário recorrer a uma frequência mais baixa.

2.3.3. PROPAGAÇÃO DA ONDA NO MEIO

Sempre que as ondas electromagnéticas atingem uma interface entre duas camadas com propriedades eléctricas distintas, vários fenómenos irão afectar o seu comportamento: reflexão, dispersão, refração e difracção.

A reflexão da onda é o fenómeno mais importante para a sua análise. O georadar capta e regista apenas a percentagem reflectida da onda. Quanto maior for o coeficiente de reflexão, maior será a amplitude do sinal lido pelo equipamento. Como o coeficiente de reflexão depende dos valores dieléctricos das camadas superior e inferior da interface, (7), quanto maior a diferença entre ϵ_1 e ϵ_2 , mais nítido será o interface na imagem exibida.

Na Figura 2.8 apresenta-se a simulação dos resultados obtidos pelo georadar para os seguintes exemplos comuns de interfaces: objecto pontual, camada fina, camada espessa e aumento progressivo do valor dieléctrico.

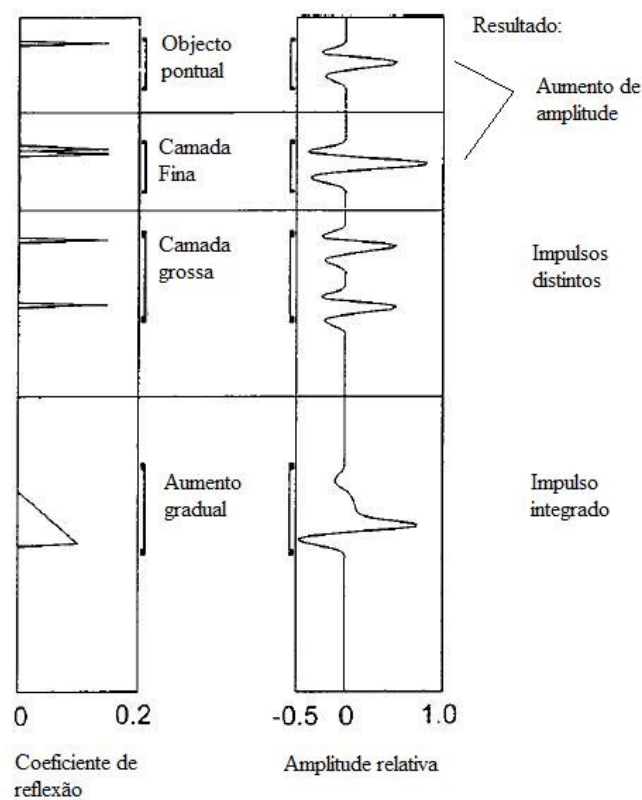


Fig.2.8 – Alguns exemplos de reflexões causadas por interfaces comuns (adaptado de [1]).

Na primeira situação, é claramente identificável a localização do objecto, pelo que é possível determinar a profundidade a que o alvo se encontra.

Na presença de uma camada fina, as reflexões do topo e da base desta são tão próximas que se traduzem num único impulso. Desta forma, consegue-se detectar a existência da camada, mas não se pode determinar a sua espessura [1].

A terceira situação corresponde à situação ideal: uma interface nítida entre duas camadas e dois impulsos distintos, provenientes dos limites superior e inferior da segunda camada, permitindo determinar a profundidade a que esta nova camada se inicia, bem como a sua espessura.

O aumento gradual do valor dieléctrico sugere a existência de uma camada com níveis crescentes de teor em água. É o que acontece, por exemplo, quando há contaminação do balastro ferroviário com solos finos, em profundidade: não existe uma fronteira entre o balastro limpo e o muito contaminado, mas antes um aumento progressivo do grau de contaminação. Esta situação reveste-se, assim, de particular importância na interpretação de resultados de uma ferrovia.

O fenómeno de refacção consiste numa mudança na trajectória das ondas quando estas atingem uma interface entre dois materiais de propriedades electromagnéticas distintas – ver Figura 2.9. A refacção provoca uma diminuição na área abrangida pelas ondas e um conseqüente aumento na densidade da energia reflectida [3].

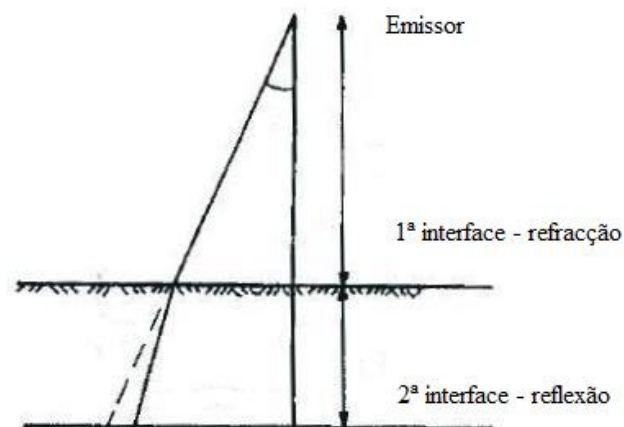


Fig.2.9 – Fenómeno de refacção (adaptado de [3]).

No caso da via férrea, devido a condicionantes geométricas desta, o equipamento de ensaio do georadar é colocado suspenso sobre esta, a sensivelmente 40 cm de altura – consultar a Figura 2.10. Embora o ângulo de incidência à superfície seja elevado, tanto na base das travessas como na base das diversas camadas da subestrutura, o efeito da refacção pode ser desprezado [1].

A difracção das ondas electromagnéticas está intimamente ligada com a interferência. No caso concreto, se a onda encontrar um objecto ou camada de dimensão inferior a uma vez e meia o seu comprimento de onda, expressão (10), a parcela reflectida interfere com a restante, podendo inclusive eliminar-se mutuamente [10] (dificilmente ocorre uma situação tão extrema). A difracção traduz a tendência que as ondas revelam de contornar objectos. Tal como a interferência, este fenómeno está interligado com o comprimento de onda. Embora, em teoria, a difracção só ocorra quando a espessura da camada for menor que metade do comprimento de onda, verifica-se que a resolução da imagem fica comprometida para espessuras inferiores ao comprimento de onda [1].

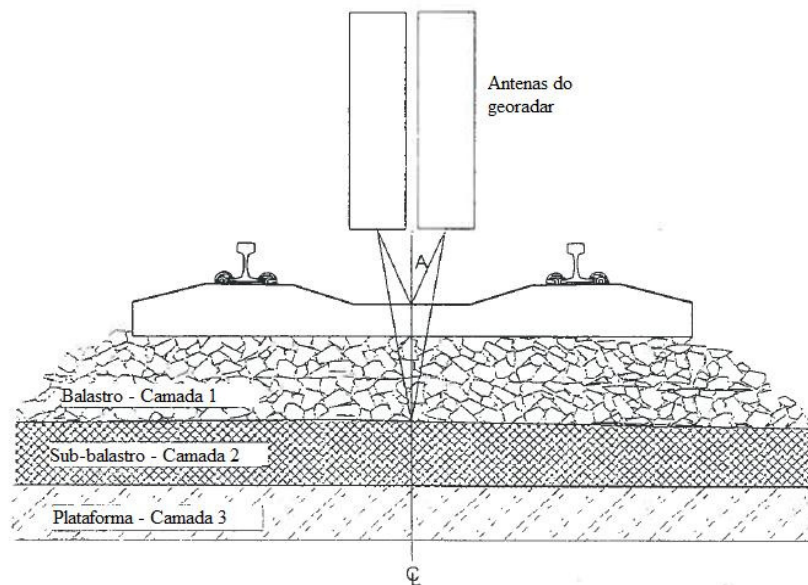


Fig.2.10 – Geometria usual de colocação do georadar na via férrea (adaptado de [1]).

Foi referido em 2.3.2. que o comprimento de onda no balastro, para a frequência de 1 GHz, é de 13 cm. Seria de esperar, atendendo às dimensões das partículas, difracção no balastro. Contudo, a contaminação do balastro anula este efeito, uma vez que os vazios são preenchidos, criando uma camada contínua com o mesmo valor dieléctrico.

2.3.4. CÁLCULO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO SINAL

A precisão dos resultados de um ensaio com georadar depende do rigor da estimativa da velocidade. Esta, como reflecte a expressão (6), é função do valor dieléctrico do meio. A constante dieléctrica de um material é influenciada por diversas características deste, o que torna esta variável muito difícil de estimar.

A execução de furos de sondagem é, sem dúvida, o método mais preciso, uma vez que fornece o valor exacto da espessura nas condições do ensaio. Por esta razão, é importante que se realizem algumas sondagens esporádicas. A escolha dos locais pode ser feita após a realização do ensaio, permitindo a identificação de zonas onde a espessura e as condições do terreno não se alterem significativamente. Assim, obtemos uma sondagem representativa de uma zona. Com os resultados das sondagens compatibilizam-se as espessuras reais com as obtidas no ensaio [6].

Sendo inviável a realização de sondagens, por qualquer motivo, existem outros procedimentos possíveis. O mais simples consiste em adoptar valores tabelados presentes na bibliografia, como os apresentados no Anexo I. Este é, obviamente, um método muito prático mas pouco preciso, devendo ser usado apenas como estimativa e nunca como valor final.

Ulriksen [3] descreve um método mais complexo, adaptado da sísmica de reflexão: o Método do Ponto de Profundidade Comum (*Common Depth Point Method*). Recorrendo a duas antenas, uma transmissora e uma receptora, este método estima a velocidade do sinal a partir da profundidade de propagação deste. É necessária a existência de um reflector plano de dimensões consideráveis a uma profundidade conhecida. A partir de um ponto central, deslocam-se as antenas em sentidos opostos e distâncias iguais, x_i , medindo-se os intervalos de tempo, t_i , para cada nova posição. A velocidade média do sinal, v , será:

$$v = \sqrt{\frac{x_a^2 - x_b^2}{t_a^2 - t_b^2}} \quad (12)$$

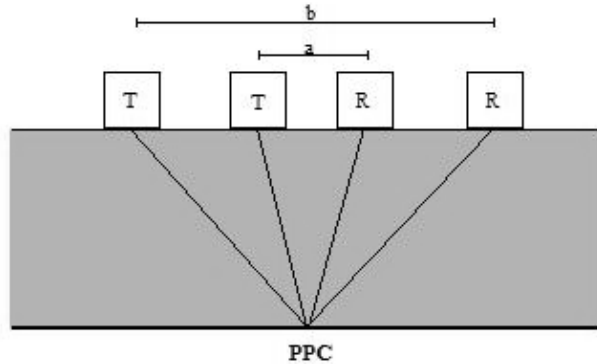


Fig.2.11 – O método do Ponto de Profundidade Comum.

O mesmo autor apresenta outro método de cálculo da velocidade, a partir de um alvo pontual. Estes alvos são muito fáceis de detectar no georadar pela forma hiperbólica do perfil (ver Figura 2.3). A distância, s , ao alvo é, efectivamente, uma função hiperbólica de x e z – Figura 2.12, como indicado na expressão (13). A partir de duas reflexões, de duas posições distintas, e dos intervalos de tempo correspondentes, é possível determinar a profundidade do objecto e, finalmente, a velocidade média.

$$s = \sqrt{x^2 + z^2} \quad (13)$$

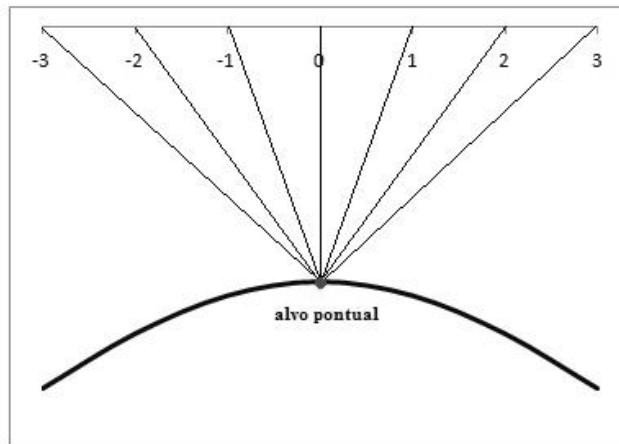


Fig.2.12 – Determinação da velocidade a partir de um alvo pontual.

Um método similar ao do Ponto de Profundidade Comum é o WARR (*Wide Angle Reflection and Ranging*). Neste, a antena transmissora é mantida fixa enquanto se varia a posição da antena receptora. A onda atravessa vários meios (ver Figura 2.13), chegando à antena receptora a vários tempos - propagação pelo ar (A), pela superfície do meio (G) e reflectida nos interfaces (R). A determinação da velocidade é feita processando esta informação [6].

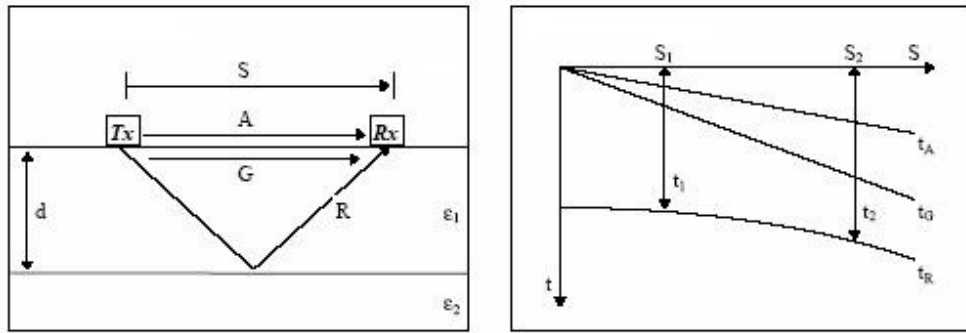


Fig.2.13 – Representação esquemática do método WARR [6].

O procedimento mais comum é o Método de Estimação da Amplitude (*Amplitude Estimation Method*). Este método é utilizado não só para determinação das velocidades dos diferentes materiais, mas também como procedimento automatizado de calibração para antenas suspensas. A primeira fase do processo consiste em obter a reflexão causada por uma placa metálica (tida como reflector perfeito) colocada à superfície, a uma altura conhecida. Em seguida, compara-se esta leitura com os sinais reflectidos nos diferentes interfaces. A velocidade de propagação na primeira camada será função das amplitudes de reflexão lidas no georadar provocadas pela placa metálica (A_m) e pela superfície da camada (A_i), resultando:

$$v = \frac{c}{\left(\frac{A_m + A_i}{A_m - A_i} \right)} \quad (14)$$

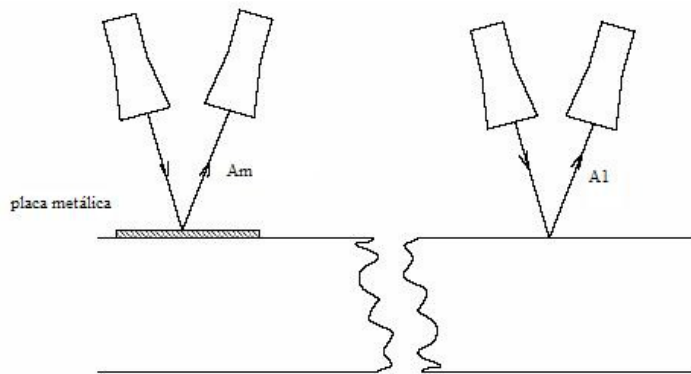


Fig.2.14 – Método de Estimação da Amplitude para cálculo da velocidade (adaptado de [6]).

Para a segunda camada, o procedimento é idêntico, mas o valor dieléctrico é calculado pela expressão (15), na qual A_2 simboliza a amplitude de reflexão no segundo interface. Para se obter a velocidade nesta nova camada, substitui-se este valor na equação (6).

$$\epsilon_2 = \epsilon_1 \left[\frac{1 - \left(\frac{A_1}{A_m} \right)^2 + \left(\frac{A_2}{A_m} \right)^2}{1 - \left(\frac{A_1}{A_m} \right)^2 - \left(\frac{A_2}{A_m} \right)^2} \right]^2 \quad (15)$$

O último método de cálculo de velocidade que importa referir neste contexto é o de Antenas Múltiplas na Superfície (*Multiple Antennas on Surface*). Tal como o anterior, também este é um procedimento de calibração automático. Como a designação sugere, este método recorre a diversas antenas, localizadas perto da superfície, que captam o sinal emitido por uma única antena transmissora. O cálculo da velocidade é feito analisando as diferenças nos intervalos de tempo para percursos distintos.

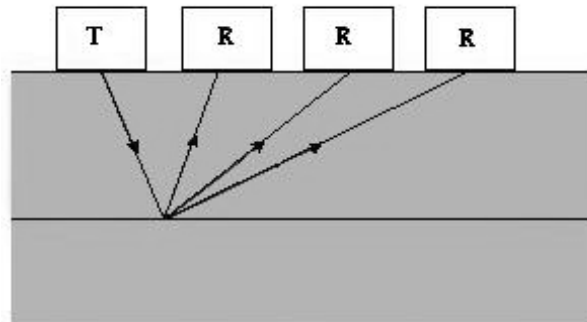


Fig.2.15 – Método de Antenas Múltiplas na Superfície.

A vantagem que os dois últimos métodos apresentam sobre os restantes é a possibilidade de medição em contínuo. Por essa razão, estes procedimentos são mais recorrentes como técnicas de calibração.

2.4. EQUIPAMENTO E ACESSÓRIOS

O equipamento base do georadar é composto por: 1) unidade de transmissão e recepção; 2) uma ou duas antenas; 3) unidade de controlo; 4) unidade de armazenamento e visualização; 5) dispositivo de controlo do intervalo de amostragem; 6) acessórios.

A unidade de transmissão e recepção – Figura 2.16 - possui um transmissor, no qual o sinal é gerado, um receptor, que capta o sinal após o seu trajecto e um sincronizador electrónico.



Fig.2.16 – A) unidade de armazenamento e visualização; B) unidade de transmissão e recepção (no sistema exemplificado, as unidades de transmissão e recepção e de controlo estão integradas).

Após a sua geração, o sinal é transmitido ao terreno através de uma antena, voltando a esta, ou a outra antena distinta, após o seu trajecto. Quando a transmissão e a recepção forem realizadas pela mesma antena, diz-se que a operação é monoestática. Se, pelo contrário, a transmissão e a recepção do sinal envolverem duas antenas distintas, diz-se que a operação é biestática.

Existem dois tipos de antenas, com diferentes campos de aplicação: antenas com contacto na superfície (*ground coupled antennas*) e antenas suspensas (*air coupled antennas*).

As primeiras, 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 [6]. 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 [2].

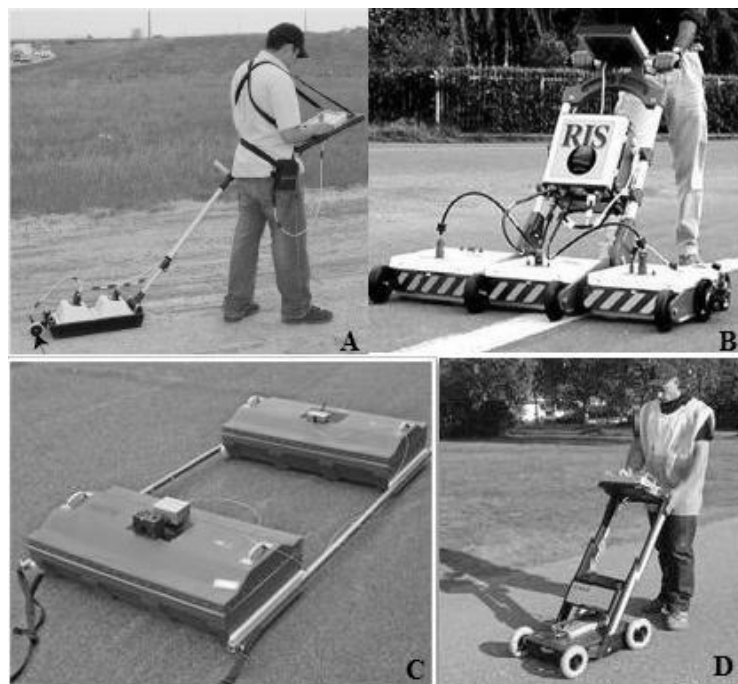


Fig.2.17 – Vários sistemas com antenas em contacto com a superfície. A) corresponde ao PulseEKKO PRO da Sensoft; B) é o RIS 2K-S da IDS [13]; C) é uma antena biestática de 100 MHz da GSSI; D) é o Easy Locator da Malá.

As antenas suspensas são equipamentos mais recentes. Geralmente são posicionadas entre 0,3 e 0,5 m em relação à superfície, de forma a evitar o choque com obstáculos e possibilitando maiores velocidades de ensaio (são possíveis velocidades na ordem dos 120 km/h). Geralmente, têm frequências entre os 500 MHz e os 2,5 GHz [2], 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.

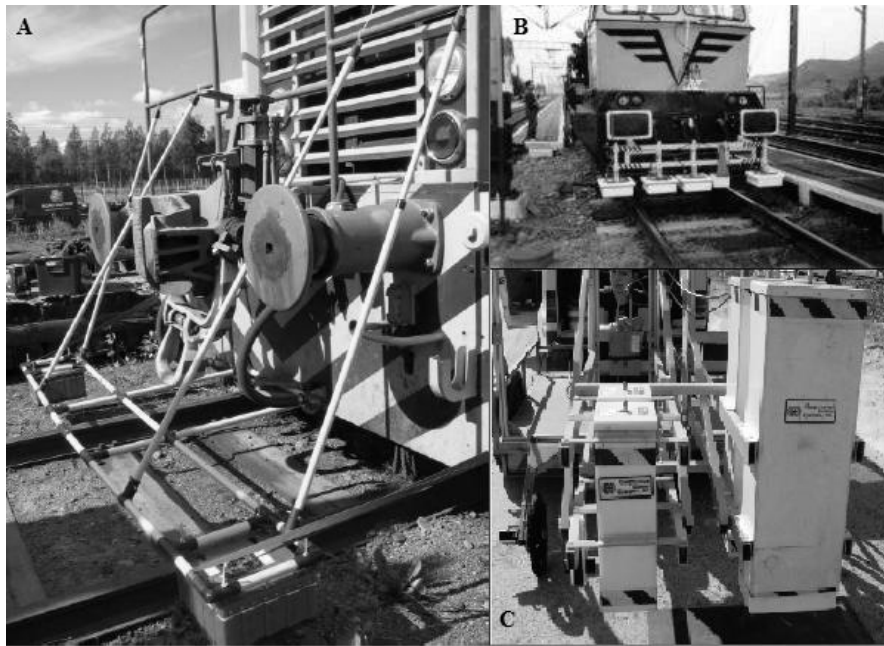


Fig.2.18 – Vários sistemas com antenas suspensas.

Para ensaios com georadar em ferrovias, é difícil optar só por um dos tipos de antenas. Dadas as características geométricas da via, as antenas suspensas são as mais indicadas pela operacionalidade. Outras vantagens são a possibilidade de velocidades superiores, evitando o corte do tráfego, e a maior resolução das imagens. Contudo, as antenas com contacto na superfície alcançam maiores profundidades de penetração, sendo as únicas que permitem visualizar camadas inferiores.

O desenvolvimento exponencial da capacidade de armazenamento e rapidez dos processadores permitiu resolver esta questão, possibilitando a criação e desenvolvimento de sistemas multi-canal, i.e., sistemas envolvendo diversas antenas a operar em simultâneo. Graças a este novo sistema, é agora possível:

- Utilizar, simultaneamente, antenas de alta e baixa frequência; assim obtêm-se imagens de maior resolução para as camadas mais superficiais juntamente com imagens de camadas mais profundas;
- Realizar combinações entre as antenas para determinação das velocidades; neste procedimento, comparam-se os resultados das várias antenas; o objectivo final é utilizar as velocidades determinadas para calcular as constantes dieléctricas das várias camadas;
- Preparação de um modelo tridimensional; dispendo várias antenas iguais, a funcionar à mesma frequência, perpendicularmente à linha de amostragem, obtêm-se também perfis transversais.

Após recolher o sinal, a antena transmite-o novamente para a unidade de controlo, a interface com o operador. Em particular, o operador controla a amostragem e a qualidade e quantidade dos filtros e amplificações. Posteriormente, a unidade de controlo envia os dados para a unidade de armazenamento e visualização.

Em função da frequência de recepção do sinal, existe uma velocidade máxima de ensaio. Velocidades superiores à permitida pelo equipamento impedem que as antenas captem o sinal, conduzindo a falhas durante a recolha dos resultados. Com o objectivo de controlar o intervalo de amostragem, acopla-se ao equipamento o dispositivo ilustrado na Figura 2.19 (roda medidora). Sempre que a velocidade é excedida, a unidade de controlo avisa o operador através de um sinal sonoro.



Fig.2.19 – Dispositivo de controlo do intervalo de amostragem (roda medidora).

Em muitos casos, principalmente em infra-estruturas de transporte, tais como ferrovias, rodovias e aeroportos, recomenda-se o recurso a equipamentos acessórios [2]. Os mais comuns são um sistema de vídeo e um sistema de posicionamento (*Global Positioning System*). O primeiro permite visualizar e gravar a zona de ensaio para que, posteriormente, possa ajudar a compreender melhor os resultados do georadar, facilitando a interpretação. O *GPS* permite projectar os resultados num mapa, o que possibilita correcções (principalmente nas rodovias, pela óbvia dificuldade em manter uma linha de ensaio constante) e comparação de resultados de outros ensaios.

Mais recentemente, têm-se verificado várias tentativas no sentido de integrar o equipamento de georadar com outros dispositivos de medição. Um destes dispositivos é o Deflectómetro de Impacto (*FWD – Falling Weight Deflectometer*). O deflectómetro é, cada vez mais, a técnica de eleição na determinação do módulo de deformabilidade equivalente no âmbito da avaliação da capacidade de carga das plataformas de ferrovias [5]. Este método utiliza como *inputs* as espessuras das várias camadas que compõem a subestrutura. Aproveitando os resultados obtidos com o georadar, não só é possível melhorar a precisão da interpretação de ensaios realizados com o deflectómetro, como criar uma base de dados contínua do troço da via em análise. Para maior aprofundamento do tema, sugerem-se os trabalhos de Fortunato [5], Fontul [6] e Fontul *et al.* [14].

2.5. PROCEDIMENTO DE ENSAIO

2.5.1. PREPARAÇÃO DO ENSAIO

Todo o procedimento de ensaio é função dos objectivos deste pelo que, previamente à programação, deve ser claramente definida a natureza do problema.

A realização de um ensaio com o georadar é possível em qualquer altura, excepto durante ou imediatamente após períodos de chuva. A presença de água livre à superfície provoca perdas consideráveis de energia (absorção elevada), inviabilizando a posterior interpretação dos resultados. Assim, o técnico que conduz o ensaio deve ter presente que a superfície a analisar não pode estar coberta por água. Porém, a presença de neve ou gelo não impede a realização do ensaio, no que concerne ao georadar. A justificação é simples: o valor dieléctrico do gelo é cerca de 3, o que equivale a uma atenuação reduzida no sinal (consultar Anexo I).

No caso das rodovias, em zonas de muito tráfego, é aconselhável conduzir o ensaio durante a noite. Este factor não apresenta uma dificuldade para o georadar, mas compromete seriamente a utilidade do sistema de vídeo.

Geralmente, são necessários dois elementos para a realização do ensaio: um condutor e um técnico. Obviamente, no caso de se operar manualmente o georadar, dispensa-se a presença do condutor.

Previamente à realização do ensaio, deve ser definido o número de alinhamentos de medição. Embora este parâmetro esteja associado ao objectivo do ensaio, é corrente adoptar-se os seguintes valores [2]:

- Em rodovias – um único alinhamento de medição, que coincidirá com a zona do perfil que se supõe mais carregada, isto é, na rodreira exterior;
- Em ferrovias – a situação mais comum envolve três alinhamentos de medição paralelos, um entre os carris e um de cada lado dos carris – ver Figura 2.18 A); porém, caso se opte por uma única linha de medição, esta deve ser realizada entre carris;
- Em pavimentos aeroportuários – recomendam-se vários alinhamentos paralelos ao eixo da pista;
- Em tabuleiros de pontes – nestas estruturas o número de alinhamentos de medição depende da largura do tabuleiro; recomenda-se que o intervalo máximo entre dois alinhamentos consecutivos seja 0,5 m.

Ainda durante a preparação do ensaio, Saarenketo [2] refere alguns ensaios de comparação e verificação de desempenho das antenas. O autor fundamenta a sua necessidade em dois argumentos: 1) o desempenho das antenas diminui com o tempo; 2) todos os sistemas georadar são únicos, obtendo-se resultados distintos com cada um, mesmo para a mesma estrutura. Os ensaios referidos são:

- Razão Ruído/Sinal;
- Estabilidade do sinal;
- Linearidade Percurso-Tempo;
- Estabilidade a longo prazo;
- Profundidade de penetração.

À excepção do último, todos os ensaios são actualmente métodos comuns de teste, quer para antenas suspensas, quer para antenas com contacto na superfície.



Fig.2.20 – Realização de um teste de desempenho a uma antena de 1 GHz [2].

2.5.2. CONDUÇÃO DO ENSAIO

Durante a condução do ensaio, a equipa deve ter em atenção a existência de elementos que possam causar interferências, tais como transmissões de rádio ou televisão, veículos, linhas eléctricas, pontes e separadores metálicos. Embora alguns destes elementos possam ser evitados, a maior parte aparecerá forçosamente nos resultados. A presença de um sistema de vídeo auxiliará o intérprete na análise destas zonas, indicando que poderão surgir picos de reflexão ou interferências causadas por estes elementos. Recomenda-se, como precaução adicional, ou como alternativa a um sistema de vídeo, a “marcação” destes elementos no perfil [8] – ver Figura 2.21.

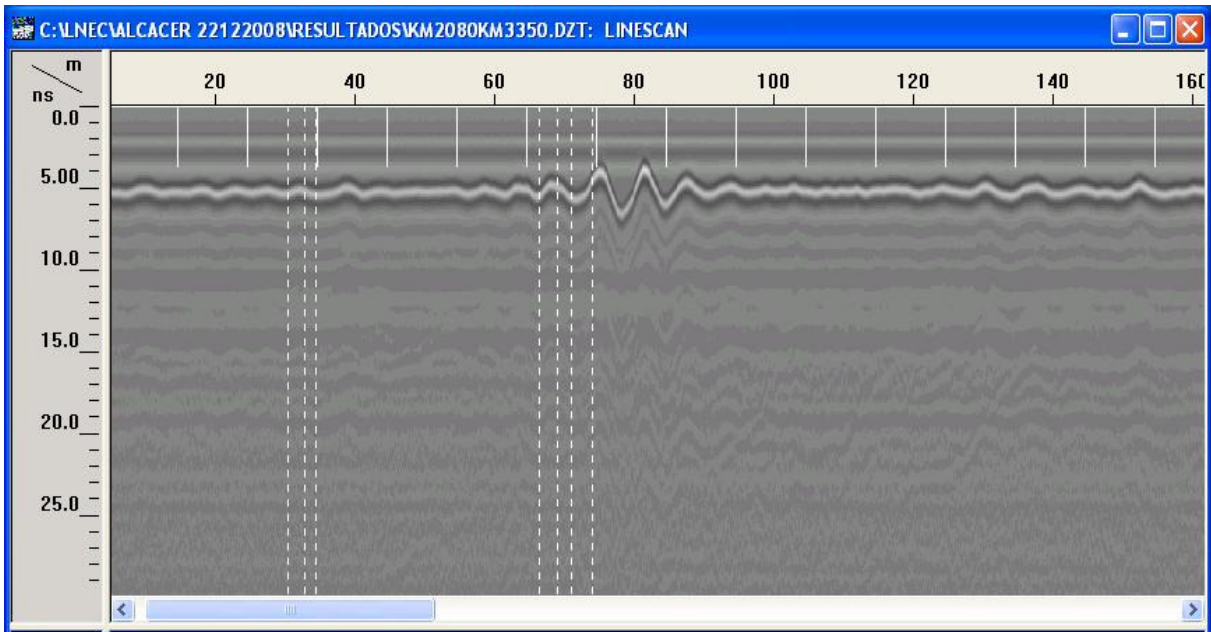


Fig.2.21 – “Marcação” de elementos no perfil.

Foi referido anteriormente que a velocidade de execução do ensaio é definida pela frequência de aquisição de dados da antena usada. Contudo, tem-se discutido a influência que a velocidade adoptada possa ter na precisão dos resultados. Alguns autores defendem que a relação entre estas duas variáveis é desprezável, enquanto outros afirmam que os menores erros estão associados às velocidades mais baixas [2]. Caso não existam condicionantes maiores, aconselha-se a realização do ensaio a velocidades reduzidas.

Saarenketo [2] refere que a rugosidade da superfície também pode comprometer a resolução da imagem, por aumento da dispersão do sinal. Contudo, o autor argumenta que o seu efeito pode ser ponderado apenas durante o processamento dos resultados.

Após a sua montagem, o equipamento requer cerca de 15-20 minutos para aquecer. É importante que este requisito seja cumprido, para evitar desvios de amplitude e/ou tempo nos ficheiros de calibração.

Durante o aquecimento do equipamento, ou em qualquer outro instante anterior à recolha de qualquer ficheiro, devem definir-se alguns parâmetros, tais como: 1) a configuração das antenas; 2) as definições de ganho e os parâmetros da imagem [6].

Quanto à configuração das antenas, deve ser especificado no *software* o tipo de antena que será usado (incluindo a frequência), a entrada na qual o cabo será ligado e a velocidade de recolha dos dados.

No que toca às definições de ganho e parâmetros da imagem, o operador deve indicar:

- Os filtros horizontais e verticais – os filtros serão tratados mais adiante neste trabalho; refere-se, por ora, que muitas unidades de controlo permitem tratar o sinal com filtros durante a recolha de dados, através da eliminação de frequências muito baixas ou muito altas (*high-pass* ou *low-pass*); recomenda-se, para antenas suspensas, que o primeiro seja metade da frequência central da antena e o segundo o triplo; para antenas com contacto na superfície, recomenda-se, respectivamente, 5 vezes e 1/5 da frequência central [2];
- A janela de amostragem – o intervalo de amostragem, t_a , está relacionado com a profundidade alcançada pelo equipamento durante o ensaio, d_p , pela equação (16); assim, este pode ser estimado, conhecendo o valor aproximado da velocidade de propagação da onda no meio, v , e a profundidade que se pretende alcançar; não dispondo destes dados, pode definir-se, inicialmente, a frequência de amostragem como sendo o dobro da frequência central do georadar [1];
- O número de amostras por imagem (scan) – a imagem criada pela unidade de armazenamento e visualização é uma conversão das amplitudes de reflexão – Figura 2.3, para uma escala a cores ou tons de cinzento – Figura 2.21; este procedimento permite ao utilizador “compactar” os resultados e facilita a sua interpretação; o valor recomendado para ensaios em infra-estruturas de transporte é 512 [2];
- O número de leituras por metro – este é o parâmetro mais importante durante a recolha de dados e depende essencialmente do objectivo do ensaio; para investigações em estradas, ferrovias ou aeroportos, 4 a 10 leituras/m é um valor razoável, uma vez que permite identificar defeitos e objectos pontuais como cabos e condutas, na estrutura; para medição de espessuras de camadas a nível de rede, normalmente é realizada apenas uma leitura por metro [2];
- A amplitude de ganho – em sistemas com antenas suspensas, como o valor das amplitudes é importante na análise, o ajuste de ganho deve ser definido pela reflexão na placa metálica, garantindo que a imagem não é “cortada”.

$$d_p = \frac{v \cdot t_a}{2} \quad (16)$$

Na Tabela 2.1 apresenta-se um exemplo dos parâmetros de entrada para recolha de dados com a versão do *software* RADAN para ferrovias (*BallastVue*), uma unidade de controlo SIR-20 da GSSI e duas antenas suspensas de 2 GHz [15].

Depois de introduzidos estes parâmetros, o operador deve proceder à calibração das antenas.

Existem diversos procedimentos de calibração, dois dos quais foram anteriormente referidos em 2.3.4. A escolha dos métodos depende do tipo de antenas utilizado, dos objectivos da investigação e de condicionantes físicas da estrutura.

Para antenas com contacto na superfície, os processos de calibração próprios são: 1) Ponto de Profundidade Comum; 2) WARR; 3) Antenas Múltiplas na Superfície. Destes, o mais frequente é o terceiro, já que permite a recolha dos dados em contínuo – ver Figura 2.18 B).

De forma a garantir que a reflexão da superfície surja na imagem, aconselha-se a realização de um teste de levantamento da antena – Figura 2.22 C). Este ficheiro permitirá igualmente, na fase de processamento, contornar as oscilações indesejáveis verificadas à superfície (*ringing*) e identificar claramente a posição desta [2].

Trabalhando com antenas suspensas, o procedimento de calibração mais eficiente é o de Estimação da Amplitude ou teste da placa metálica – Figura 2.22 B). Vários autores referem que se devem recolher

ficheiros de calibração por este método antes do ensaio, após e sempre que o sistema seja desligado ou a altura das antenas se altere [2] [6].

Embora se admita o ar como um meio transparente, a verdade é que este provoca alterações (muito ligeiras) ao sinal. Com o intuito de eliminar este efeito em fase de processamento, deve ser recolhido o “sinal aéreo”. Para tal, inverte-se a posição da antena, captando um sinal sem reflexões.

O último ficheiro de calibração diz respeito à altura da antena em relação à superfície. Durante o ensaio, o veículo ao qual o equipamento está acoplado sofre vibrações e oscilações. Estas irão alterar ligeiramente a altura da antena. Assim sendo, durante a calibração do equipamento usando placa metálica, simula-se uma oscilação das antenas. Este ficheiro permitirá avaliar o efeito referido nos resultados finais. Uma forma comum de recolher este ficheiro de calibração é o teste de oscilação – Figura 2.22 A).

Tabela 2.1 – Parâmetros do SIR-20 para recolha de dados com o BallastVue [15]

Parâmetro	Valor
# Canais	2
Taxa de transmissão	300 kHz (Internacional)
Leituras/segundo	O máximo possível
Leituras/m	2, 5, 10
Metros/Marco	25
Intervalo de Amostragem	15 ns
Filtro <i>high-pass</i>	250 MHz
Filtro <i>low-pass</i>	5000 MHz
# Pontos de Ganho	1
Valor do Ganho	Definido pelo utilizador
Posição	Definido pelo utilizador
GPS	Sim



Fig.2.22 – Procedimentos típicos de calibração; A) teste de balanceamento; B) teste de posicionamento; C) teste de levantamento da antena [2].

Sempre que, por qualquer motivo, se altere um parâmetro do ensaio, estes procedimentos deverão ser repetidos. De resto, os ficheiros de calibração podem ser recolhidos antes ou após o ensaio.

Como foi mencionado em 2.3.4, a forma mais eficaz e precisa de calcular a velocidade de propagação das ondas e, conseqüentemente, as espessuras das várias camadas, é através da realização de sondagens, com extracção de amostras. A escolha dos locais de ensaio é feita identificando no ficheiro de resultados zonas onde não se verifiquem variações significativas das espessuras das camadas.

2.6. PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

A fase de processamento e interpretação dos resultados é a mais demorada de todo o ensaio. Nesta fase, a experiência traça a fronteira entre uma boa análise dos resultados e uma interpretação imprecisa.

Geralmente, o tratamento e análise dos resultados é subfaseado em: 1) Pré-Processamento; 2) Processamento; 3) Interpretação e Visualização; 4) Relatório de Ensaio.

2.6.1. PRÉ-PROCESSAMENTO

Nesta etapa, não é realizado nenhum processo de modificação sobre os dados em si.

Caso se tenham realizado várias linhas de medição na mesma via, é nesta fase que estas serão comparadas, “recortadas” e combinadas entre si. Em seguida, estes dados serão projectados numa planta à escala, por comparação com os resultados do sistema de vídeo ou GPS, ou pelos “marcadores” adicionados durante o ensaio. Finalmente, é também nesta fase que os resultados de outros ensaios (incluindo as sondagens) serão adicionados e localizados na planta.

A partir desta altura, o operador deve ter em atenção que a polaridade e a cor do sinal seguem uma determinada convenção. Mais à frente, na fase de interpretação, esta convenção permitirá ao intérprete ler e analisar correctamente (e mais facilmente) os resultados. Num sinal obtido com o georadar, o pico máximo de reflexão é positivo. Geralmente, uma reflexão só é considerada válida se tiver um pico positivo e outro negativo.

2.6.2. PROCESSAMENTO

O primeiro passo na fase de processamento é a calibração dos resultados, recorrendo aos ficheiros recolhidos durante o ensaio e referidos anteriormente.

Assim, trabalhando com antenas com contacto na superfície, procede-se à definição da superfície nos dados e à remoção do ruído.

Utilizando antenas suspensas, é feita a subtracção do sinal aéreo, quer aos dados quer ao ficheiro da placa metálica. Após a definição da superfície, eliminam-se as mudanças provocadas pelo balanceamento da antena, calculando o valor dieléctrico da primeira camada. A remoção do ruído também decorre nesta fase.

O ruído num sinal pode ser de dois tipos [1]:

- Coerente: tipo de ruído que se espera encontrar ao longo de todo o ensaio, como os múltiplos;
- Incoerente: ruído aleatório e pontual, causado ora pelo sistema ora pela envolvente.

Os múltiplos correspondem a reflexões que reverberam no meio, seguindo uma trajetória imprevista – Figura 2.23. Estas reflexões não correspondem a novas interfaces, pelo que é essencial identificá-los para que não dificultem a interpretação. A distinção entre reflexões verdadeiras e reflexões causadas por ruído nem sempre é óbvia, contando muito a experiência do intérprete e o seu conhecimento das condições do terreno ensaiado.

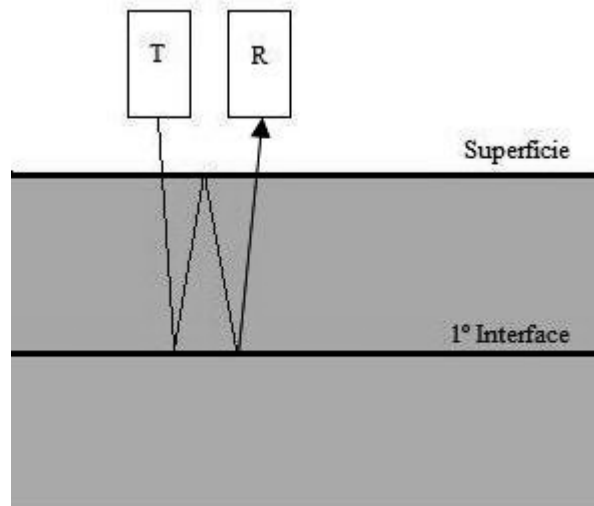


Fig.2.23 – Exemplo do processo de formação de um múltiplo.

A técnica mais comum de remoção/redução do ruído é a aplicação de filtros. Os filtros usados no processamento de resultados do georadar podem ser de dois tipos: FIR (*Finite Impulse Response*) e IIR (*Infinite Impulse Response*). Os filtros podem ainda ser subdivididos conforme a parcela do sinal que é modificada ou alterada pela sua aplicação. Existem, assim, quatro classes de filtros:

- Os que permitem a “passagem” de uma banda de frequências, eliminando frequências baixas e elevadas – *band-pass*;
- Aqueles que, pelo contrário, filtram uma determinada banda e não alteram as frequências extremas – *band-reject*;
- Filtros que permitem a “passagem” de frequências superiores à estabelecida – *high-pass*;
- Aqueles que permitem a “passagem” de frequências inferiores à estabelecida – *low-pass*.

Os filtros FIR são mais simples de usar, sendo particularmente indicados para antenas suspensas [2]. Geralmente, são do tipo *high-pass*, *low-pass* ou *band-pass*, embora os mais comuns em *software* de processamento sejam os dois primeiros (recorde-se a Tabela 2.1).

Os filtros IIR são mais difíceis de conceber e analisar, pelo que não são muito comuns. A sua principal vantagem é a sua eficácia em relação ao poder de computação que exigem [1]. Estes filtros são recomendados para a fase de aquisição de dados realizada com antenas com contacto na superfície [2].

No entanto, existem outras técnicas de melhoramento do sinal. Sussmann [1] refere como procedimentos de alteração do sinal: 1) Deconvolução; 2) Migração; 3) Filtragem F-K.

A deconvolução é uma técnica que visa melhorar a resolução temporal da imagem por compressão de breves oscilações do sinal (*wavelets*). Por este processo, as reflexões tornam-se mais aparentes mas, para a sua aplicação, é necessária informação de campo.

Uma técnica mais comum é a migração, utilizada na presença de camadas inclinadas. O objectivo da migração é eliminar as difracções criadas nestas condições e mover as reflexões para a sua posição correcta. Quando a migração dos dados é feita no domínio de tempo, diz-se temporal. Se, pelo

contrário, for realizada no domínio de distâncias, diz-se de profundidade. A migração temporal é mais simples e rápida mas, caso se verifique que a velocidade varia significativamente, deve-se recorrer à migração de profundidade.

Tal como a migração, a filtragem F-K está associada à inclinação das camadas. Aliás, a filtragem F-K não é mais do que a técnica de migração aplicada a duas dimensões, recorrendo ao número de onda (*wavenumber*) associado a cada camada. Uma camada horizontal tem um número de onda nulo e, quanto maior for a inclinação da primeira, maior o segundo. Como tal, se não forem expectáveis camadas muito íngremes no terreno, a imposição de um valor limite ao número de onda eliminará a energia associada a ruído que poderia induzir em erro o intérprete.

2.6.3. INTERPRETAÇÃO E VISUALIZAÇÃO

A interpretação dos resultados do processamento consiste na discriminação, por parte do intérprete, de reflectores verdadeiros (e significativos para o objectivo do ensaio) em relação a outras interfaces. Reflexões provenientes de elementos como as travessas, por exemplo, são normais mas irrelevantes. Cabe ao intérprete ignorar estes elementos (no caso concreto, terá que desprezar reflexões periódicas em forma de hipérbole), concentrando-se nas reflexões essenciais.

Em perfis relativos a infra-estruturas de transporte ferroviário, entre outros elementos, o intérprete poderá identificar, nomeadamente, as camadas de balastro, de sub-balastro e, eventualmente, de coroamento. Em algumas situações, poder-se-á ainda fazer uma interpretação da subestrutura a maior profundidade.

Segundo [10], sempre que sejam estipulados como objectivos do ensaio, os objectos pontuais encontrados no subsolo devem ser identificados no relatório final, por meio de símbolos.

O intérprete deve assinalar igualmente no relatório passagens superiores e inferiores, cabos e possíveis reflectores metálicos, os possíveis defeitos encontrados, a posição do nível freático e, se visível, o horizonte rochoso (*bedrock*).

Com o auxílio das amostras retiradas no terreno e de uma simbologia adequada, o intérprete pode distinguir os diversos tipos de solos e rochas identificados.

No Anexo II refere-se a simbologia usada e recomendada pelo autor para identificação no relatório final dos elementos referidos.

Num perfil do georadar, a localização exacta da interface dieléctrica não é evidente. Geralmente, ocorrem várias reflexões, surgindo vários picos de amplitude (positivos e negativos) no perfil. Cabe ao intérprete seleccionar um destes picos em detrimento dos restantes.

Referem-se duas formas de situar as interfaces no perfil:

- Na máxima amplitude de reflexão – esta é a forma de interpretação mais comum e mais precisa; no entanto, o intérprete deve atender a mudanças de polaridade no sinal;
- Na amplitude nula após o primeiro pico de reflexão – esta técnica previne as dificuldades causadas pelas mudanças de polaridade, mas tende a fornecer informações erradas.

Muitas empresas têm-se concentrado em desenvolver *software* de interpretação automática. No entanto, as variáveis envolvidas são demasiadas, levando a crer que a automatização nunca será possível, para a maioria das estruturas.

Não obstante, a interpretação automática pode ser útil (e eficaz) em estruturas novas, para as quais existem maiores certezas em alguns parâmetros.

No caso ferroviário, caso se conheça a espessura das camadas e o seu teor em água, e estes não variem significativamente ao longo de um percurso em análise, o intérprete pode utilizar o método do georadar para analisar o grau de contaminação do balastro ao longo do troço investigado.

Nas ferrovias antigas, tanto a espessura como o teor em água ou o grau de contaminação podem provocar alterações no perfil obtido, impossibilitando a automatização da interpretação. Nestes casos, a experiência do intérprete permitir-lhe-á discernir qual a singularidade evidenciada.

Nesta fase, todos os conhecimentos que o intérprete possuir sobre o local serão essenciais. Dado isto, a sua tarefa será facilitada pelo sistema de vídeo, pelas sondagens realizadas e, principalmente, pela sua presença no local durante a realização do ensaio.

3

APLICAÇÃO DO GEORADAR A INFRA-ESTRUTURAS FERROVIÁRIAS

3.1. INTRODUÇÃO

No que às infra-estruturas de transporte diz respeito, o georadar constitui uma técnica de ensaio extremamente vantajosa. Este equipamento pode proporcionar aos técnicos informação útil e fidedigna sobre as condições da estrutura, de uma forma contínua, imediata e não-invasiva. Em adição, o georadar permite investigar o terreno de forma rápida, evitando, muitas vezes, a interrupção do tráfego na via, com óbvias repercussões no custo total do ensaio.

No entanto, é nas rodovias que o georadar tem tido maior aceitação, sendo que, nas estruturas ferroviárias, as aplicações são mais recentes. Saarenketo [2] refere que o método se tornou mais comum entre engenheiros ferroviários em meados dos anos 90. Os primeiros relatos de aplicação nestas estruturas surgiram na Europa e, posteriormente, nos EUA [1].

A lenta aceitação do georadar em infra-estruturas ferroviárias deve-se a dois factores:

- **Condicionantes geométricas da via** – a presença de diversos elementos (como os carris metálicos, as travessas em betão e as catenárias) cria interferências, problemáticas, no perfil; por outro lado, a superfície irregular da via e a dimensão das partículas, pode originar fenómenos de difracção e consequentes perdas de resolução; finalmente, durante o ensaio, poderão surgir obstáculos que danifiquem as antenas, pelo que o operador deve garantir que estas não colidam nem com as travessas nem com os dispositivos de mudança de via;
- **A importância recente que a subestrutura da via adquiriu no âmbito da construção e reabilitação de ferrovias** – até há bem poucos anos, o sub-balastro raramente era considerado no dimensionamento e na implementação de propostas de reabilitação; embora se tivesse conhecimento da relação entre a deterioração da via e as condições da subestrutura, estas apenas começaram a ser consideradas pelos engenheiros ferroviários devido à crescente necessidade de maiores velocidades e cargas por eixo [16].

Muitas companhias de manufacturação de georadar têm providenciado novos equipamentos, adaptados às condições físicas das ferrovias. Este facto, aliado ao engenho e experiência dos técnicos, permite contornar o primeiro factor referido. Ainda assim, a escassez de técnicos qualificados e de equipamentos em Portugal é uma realidade, pelo que a prioridade no nosso país passa pela formação dos primeiros e aquisição dos segundos.

A investigação das camadas da subestrutura é, obviamente, mais exigente. Em contrapartida, é sobre o comportamento mecânico dos materiais da subestrutura que existem maiores incertezas.

Os principais defeitos na subestrutura ferroviária são causados: 1) pela natureza dinâmica das cargas impostas pelos veículos; 2) pela presença de partículas de granulometria fina; 3) pelo elevado teor em água, causado quer pela subida do nível freático, quer pelo mau funcionamento do sistema de drenagem.

No Anexo III, Tabela III.1, referem-se os principais problemas passíveis de surgir na subestrutura de uma ferrovia, os quais foram apontados por Brough *et al.* [16]. Os quatro primeiros tipos de rotura são causados, principalmente, pela aplicação de cargas repetidas. Os dois seguintes são fruto da acção do peso próprio, enquanto os restantes são motivados por factores ambientais.

Os mesmos autores apresentam as técnicas de ensaio (adaptadas do conhecimento nas rodovias) mais indicadas para realização nas infra-estruturas ferroviárias. Estas foram seleccionadas com base na utilidade das variáveis medidas, a relação entre a carga de ensaio e a carga de serviço, a sua facilidade de implementação, o procedimento de ensaio, a sua precisão, economia e velocidade de ensaio.

Os ensaios são diferenciados conforme a necessidade de interrupção da via ao tráfego. Na Tabela III.2 do Anexo III apresentam-se aqueles cujo objectivo é caracterizar a totalidade da via, identificando possíveis locais de risco. Estes requerem acesso intermitente à via. Na Tabela III.3 do mesmo Anexo referem-se técnicas de ensaio mais demoradas, cujo objectivo é confirmar as causas dos problemas identificados anteriormente e fornecer parâmetros geotécnicos de dimensionamento de medidas de reabilitação. Estes, por serem mais demorados, serão realizados durante a noite.

Neste contexto, o georadar é apresentado como uma técnica do primeiro nível de investigação. Na caracterização da ferrovia, vários autores atestam a capacidade do georadar para:

- Determinar as espessuras das camadas de apoio da subestrutura;
- Avaliar o estado dos materiais que as compõem;
- Identificar causas de fenómenos de instabilidade;
- Identificar a posição do nível freático e possíveis escoamentos sob a plataforma;
- Determinar o estado das travessas [5].

3.2. ESTADO DA ARTE

É um facto que as referências a casos de aplicação do georadar a infra-estruturas ferroviárias não são muitas, mesmo a nível europeu. No entanto, a evolução do método é promissora.

Embora existam relatos anteriores, apenas em 1985 se reconheceram os benefícios da aplicação da técnica nas ferrovias [1]. Com o recente desenvolvimento de novas antenas e programas de interpretação dedicados a este tipo de aplicação, sobretudo pela GSSI, surgem novas possibilidades, começando a aparecer mais casos de estudo, abordando diversas potencialidades do equipamento e obtendo resultados sucessivamente melhores.

De seguida apresentam-se, resumidamente, alguns relatos da aplicação do georadar em ferrovias. O objectivo é fazer uma breve síntese do estado da arte do tema, a sua evolução temporal e espacial, bem como as principais vantagens e dificuldades experimentadas pelos investigadores.

3.2.1. THE FINNISH GEOTECHNICAL SOCIETY [10]

Em 1992, os membros da Finnish Geotechnical Society salientavam o uso frequente do georadar para investigações em rodovias, ferrovias e pontes no seu país. Estas incluíam a identificação da estrutura geológica onde será realizada a via, a medição de espessuras das camadas e avaliação da qualidade das estruturas rodoviárias, identificando possíveis causas de defeito estrutural.

No que concerne às investigações do leito da via, os autores realçam a importância do método na redução do número de sondagens, testes sísmicos ou secções escavadas. Segundo os mesmos, o engenheiro deverá recorrer a estas apenas nos locais mais relevantes, com o propósito de confirmar/calibrar os resultados do georadar.

Os autores referem que o georadar poderá também ser usado na determinação da posição do nível freático, com aplicação no dimensionamento de sistemas de drenagem, e para localizar o horizonte rochoso, quando forem necessárias soluções geotécnicas específicas.

Na altura, a antena de maior frequência ao seu dispor era a de 900 MHz, para a qual obtinham uma resolução mínima de 2-3 cm nas camadas superficiais e 4-6 cm nas camadas de base. A presença de solos ricos em argilas ou siltes, dificultava a aplicação do método, pela fraca resolução e baixa profundidade de penetração. No entanto, os autores referem a possibilidade de melhorar a resolução por processamento do sinal.

Relativamente às ferrovias, os autores constataram que, dada a dificuldade em realizar um perfil transversal, para se obter um perfil tridimensional da via, as medições deveriam ser feitas apenas longitudinalmente, entre ou próximo dos carris.

Em comparação com medições em rodovias, verificaram que a precisão dos resultados em ferrovias era menor, fruto da alternância entre travessas e balastro.

3.2.2. JACK, JACKSON [17]

O trabalho desenvolvido por Jack e Jackson, em 1999 na IMC Geophysics Ltd., pretendia apresentar o georadar como uma técnica útil em trabalhos de manutenção de infra-estruturas ferroviárias. O objectivo dos autores consistia em demonstrar que, combinando o georadar com técnicas de ensaio usuais, é possível tornar o processo de manutenção mais económico.

Segundo os autores, recorrendo ao georadar, é possível determinar certas propriedades da subestrutura ou escolher mais eficazmente outras técnicas de manutenção, caracterizando, comparativamente, várias secções da via. O método será, assim, uma ferramenta de avaliação qualitativa da via.

Para a aquisição dos dados, serviram-se do sistema PulseEKKO 1000, da Sensors and Software Inc., com antenas em contacto com a superfície – Figura 3.1. Dada a sua portabilidade, puderam realizar o ensaio com a estrutura em serviço, sem necessidade de encerrarem a via, a uma velocidade média de 1,5 km/h (a pé). Os autores apontam a necessidade de dois elementos para a recolha de dados. Estes, seriam exibidos em tempo real, embora o processamento só seja realizado numa fase posterior.

Entre 1997 e 1999, a IMC Geophysics Ltd. conduziu ensaios ao longo de cerca de 50 km. Da sua experiência, os autores concluem: 1) a contaminação do balastro compromete seriamente a resolução das imagens, assim como dificulta a identificação de interfaces; 2) a presença dos carris metálicos ou das travessas em betão não provocaram interferências ao sinal, uma vez que a recolha dos dados era realizada entre estes elementos; 3) de todas as frequências utilizadas, as que providenciaram melhores

resultados foram as de 450 e 900 MHz, não se verificando melhorias significativas com a alteração da orientação das antenas.



Fig.3.1 – Equipamento de georadar em uso. As dimensões reduzidas do equipamento permitiam que este se ajustasse aos intervalos entre travessas, facilitando a recolha de dados [17].

Para uma avaliação preliminar da via, os autores notam uma ligeira vantagem na utilização da antena de 450 MHz, nomeadamente porque: 1) para a mesma extensão de via, serão necessárias apenas metade das medições, facilitando o processamento; 2) interfaces menos óbvios são mais fáceis de identificar com comprimentos de onda superiores; 3) maior profundidade de penetração.

Com base nos ensaios realizados, os autores concluem que o georadar poderá ser utilizado para:

- Identificar secções de balastro em boas condições;
- Identificar zonas do balastro de espessura reduzida;
- Identificar secções de balastro com profundidade variável, as quais poderão exigir medidas de manutenção especiais;
- Escolher as técnicas de monitorização mais adequadas com base na comparação dos resultados de diversas secções;
- Monitorizar a consistência e a espessura das camadas de balastro limpas, para controlo de qualidade.

3.2.3. SUSSMANN [1]

Na sua tese de doutoramento, apresentada em 1999, Sussmann descreve a aplicação do georadar tanto em secções piloto em condições laboratoriais controladas, como em casos reais de estudo.

O troço de via de ensaio foi construído na UMass (*University of Massachusetts Amherst*), nas imediações do laboratório de Guinness, com o propósito de avaliar o efeito de diversos factores no sinal do georadar. Foram testadas quatro combinações de secção transversal da subestrutura: 1) balastro limpo, sub-balastro em areia cascalhenta, base estabilizada e solo natural; 2) balastro limpo, argila, base estabilizada e solo natural; 3) balastro contaminado, sub-balastro em areia cascalhenta, base estabilizada e solo natural; 4) balastro limpo, sub-balastro em rochas ígneas, argila, base estabilizada e solo natural. A camada formada por rochas ígneas na 4ª combinação surge porque se acreditava que a condutividade destas dificultaria a obtenção de resultados. Na superestrutura foram usadas travessas em betão e madeira, procurando avaliar os diferentes efeitos destes materiais na qualidade do sinal.

Utilizaram-se dois equipamentos distintos: 1) uma unidade de controlo SIR-10H da GSSI com antenas suspensas de 2,5 ou 1 GHz ou antenas em contacto com a superfície de 900 e 500 MHz; 2) um sistema PulseRadar com uma antena suspensa de 1 GHz.

Uma das primeiras questões à qual o autor procurou responder foi de que forma a alternância entre balastro e travessa compromete os resultados. As ilações retiradas foram:

- A alternância entre balastro e travessa parece ter um efeito muito limitado nos resultados; embora sejam nítidas as reflexões causadas pelas travessas, a profundidade de penetração não se altera, pelo que o autor conclui que, neste contexto, este factor pode ser desprezado;
- O carácter do sinal recebido correspondente aos locais de balastro e travessa varia com a altura da antena em relação a estes e ao tipo de travessa; assim, para travessas em betão, a reflexão máxima obtém-se no balastro, enquanto que para travessas em madeira, esta se obtém na própria travessa; o autor sugere que esta diferença será causada pela presença de armadura nas travessas em betão;
- Devido a esta alternância, é impossível recorrer a técnicas de calibração e processamento que assumam uma superfície regular para calcular o valor dieléctrico da primeira camada; em adição, não é viável utilizar os mesmos algoritmos de processamento para travessas em betão e em madeira; para o autor, a técnica mais adequada para ferrovias é a de Antenas Múltiplas na Superfície, ou qualquer outra baseada no conceito de *normal moveout*;
- Contrariamente ao esperado pelo autor, o valor dieléctrico das travessas de madeira era igual ao das de betão; segundo o autor, este facto deve-se à presença do balastro entre as travessas, o qual controlará a reflexão na base da travessa, ou da armadura no interior das travessas de betão; no entanto, o mesmo refere que este tópico deverá ser alvo de discussão e pesquisa.

Durante os ensaios realizados com as antenas suspensas, a interface entre a base estabilizada (em cimento) e as camadas superiores de argila ou areia cascalhenta não era claramente visível. A interpretação destas interfaces tornou-se ainda mais difícil após a contaminação do balastro e a adição da camada em rochas ígneas. Para ambas as antenas de 1 GHz obtiveram-se melhores resultados com polarização horizontal (perpendicularmente às travessas). Contudo, o autor salienta que este procedimento é difícil de implementar com o sistema PulseRadar, uma vez que este foi concebido para operar com polarização transversa (paralelamente às travessas).

Utilizando antenas com contacto na superfície, esta característica inverte-se. Embora operando com polarização horizontal sejam visíveis todas as camadas da subestrutura, a interpretação das interfaces com as camadas de rochas vulcânicas ou areia cascalhenta permanece pouco clara. Recorrendo a polarização transversa, não só se torna mais fácil detectar as camadas, como é possível obter informação de camadas mais profundas. Assim, para este tipo de antenas, o autor recomenda o uso de polarização transversa.

O mesmo refere que, para investigações mais profundas (camadas de sub-balastro e solo natural) é frequente, em prospecção geofísica, recorrer-se a antenas biestáticas. No entanto, fruto da interferência metálica, nas ferrovias este procedimento conduz a resultados com muito ruído, sendo preferível usar-se então antenas monoestáticas, com polarização transversa.

Ainda que reconheça que as antenas suspensas são mais estáveis e fáceis de manobrar (por estarem acopladas a um veículo), o autor salienta que as antenas com contacto na superfície são mais simples

de manusear (têm maior liberdade de movimentos). Por outro lado, na altura, existiam poucas empresas a disponibilizar antenas suspensas.

Durante a calibração das antenas suspensas, testaram-se diversas alturas destas em relação à superfície do balastro. Os resultados sugeriam que a amplitude de reflexão da placa metálica diminuía à medida que se aumentava a altura das antenas. Como tal, a escolha da altura ideal das antenas deverá ser função, não apenas dos obstáculos que se pretende evitar, mas também da amplitude do sinal recebido.

Analisando os resultados dos primeiros ensaios, notou-se que os próprios veículos de transporte causavam reflexões indesejáveis, pelo que estes foram modificados, suspendendo as antenas numa posição mais afastada deste por meio de vigas. Em comparação, as novas imagens eram mais claras, com melhor resolução e permitindo distinguir melhor a posição das travessas.

Finalmente, o autor conclui, comparando as reflexões da placa metálica, das travessas e do balastro, que existem diferenças significativas entre estas, causadas principalmente por variações da elevação, que não podem ser eliminadas por simples subtração. Assim, embora esta seja uma técnica muito útil em rodovias, não é viável em ferrovias.

Após a apresentação dos resultados de ensaios sobre esta secção piloto, o autor descreve a aplicação do método em diversas ferrovias nos EUA e em Inglaterra, entre 1994 e 1997.

Foram utilizados dois sistemas de georadar: 1) uma unidade de controlo SIR-10H ou SIR-10A da GSSI, com antenas suspensas de 1 GHz e antenas com contacto na superfície de 100, 400, 500 e 900 MHz; 2) um equipamento da PulseRadar, com uma antena suspensa de 1 GHz. As antenas de 1 GHz da GSSI foram usadas com orientação e polarização longitudinais e colocadas a 23 cm de altura sobre as travessas. A velocidade de ensaio variou entre os 10 e os 24 km/h, com o sistema SIR-10H, e 16 km/h, com o sistema SIR-10A. As antenas da PulseRadar foram orientadas longitudinalmente, mas operaram com polarização transversa. A altura em relação às travessas foi de 23 cm e a velocidade de ensaio rondou os 16 km/h. As antenas com contacto na superfície foram manobradas manualmente, obrigando a velocidades menores (3 a 5 km/h).

Na Tabela 3.1 referem-se os locais onde se encontram as ferrovias estudadas. Apresentam-se também o ano da realização dos ensaios, o comprimento do troço, a ferrovia em causa e o sistema georadar usado.

Os testes realizados em Boston visavam avaliar a eficácia do georadar na análise das condições da subestrutura. Foi utilizado o sistema da PulseRadar descrito anteriormente e o segundo sistema da GSSI com uma antena de 500 MHz.

Em Glenn Dale, o aterro sobre o qual estava construída a via era uma fonte de assentamentos significativos. A investigação com o georadar tinha como propósito determinar a natureza desta instabilidade. Foram usadas as antenas de 100 e 400 MHz da GSSI para determinar mudanças na subestrutura, localizar futuras sondagens e delimitar secções do aterro com características semelhantes.

No Colorado, os ensaios incidiram sobre um troço com vários problemas na subestrutura. Recorreu-se ao sistema da SIR-10A da GSSI com antenas de 1 GHz para investigar possíveis causas de instabilidade.

Os ensaios realizados perto da UMass, entre 1994 e 1996 pretendiam testar diversos procedimentos e metodologias de ensaio. Entre 1994 e 1995, usou-se o sistema SIR-10H com antenas de 1 GHz; em 1996, utilizou-se o sistema da PulseRadar.

Em Inglaterra, os estudos foram conduzidos numa série de vias paralelas (*railyard*), recorrendo às antenas de 500 e 900 MHz e à unidade de controlo SIR-10A. O objectivo passava por determinar mudanças na subestrutura da via (e possíveis causas) para localização de futuras sondagens.

Tabela 3.1 – Características dos locais estudados [1]

Localização	Ano	Extensão (m)	Ferrovias	Sistema georadar
Boston, Massachusetts	1996	1600	Amtrak/MBTA	GSSI, PR
Glenn Dale, Maryland	1997	500	Amtrak	GSSI
Perryville, Maryland	1995	64000	Amtrak	GSSI
Perryville, Maryland	1996	305000	Amtrak	PR
Amherst, Massachusetts	1994-1996	4800	NECR	GSSI, PR
Wernersville, Pennsylvania	1995	25000	Conrail	GSSI
Trinidad, Colorado	1995	38600	BNSF	GSSI
Selhurst, Inglaterra	1997	300	Railtrack	GSSI

3.2.4. HUGENSCHMIDT [18]

Em 2000, o autor apresenta neste texto três casos de estudo realizados na Suíça, sob a alçada da *Swiss Federal Railways* (SBB), no âmbito da renovação de infra-estruturas ferroviárias. O objectivo dos ensaios descritos era avaliar os benefícios e as limitações do georadar em investigações em ferrovias. Para tal, cumulativamente aos perfis, e suportando a interpretação feita através destes, foram escavadas secções transversais da via com base nos resultados preliminares.

No conjunto dos três troços inspeccionados, totalizando 15,1 km de via, o autor focou o seu estudo na determinação da espessura do balastro e na detecção de zonas onde houvesse penetração do balastro por material do subsolo. Os ensaios foram realizados no Verão de 1997 usando uma antena de 900 MHz e uma unidade de controlo SIR-10A da GSSI. As antenas foram suspensas 8 cm em relação às travessas e orientadas transversalmente. A velocidade de aquisição foi de 10 km/h, recolhendo dados em contínuo (mesmo sobre as travessas). Desta forma, o autor evitou a necessidade de um sistema de aquisição complexo.

A qualidade das imagens após processamento era muito boa, à excepção de locais próximos de estações. Nestas zonas, a presença de um grande número de instalações e de lixo no topo do balastro afectaram consideravelmente a resolução dos perfis. A comparação dos resultados obtidos pelo georadar com secções escavadas posteriormente ao processamento revelou erros médios de 4 cm. Em

três zonas, porém, as diferenças foram superiores a 10 cm, causadas por má interpretação de reflectores.

Dos dezanove locais de penetração do balastro no solo subjacente identificados em secções transversais escavadas, doze foram detectados durante a pesquisa com o georadar e outros dois foram definidos como possíveis zonas de penetração. Os restantes cinco não foram identificados pelo georadar por duas razões: 1) em dois locais, a penetração do material do subsolo era de apenas 2 e 4 cm, respectivamente; 2) as demais estavam localizadas em ou perto de estações ferroviárias onde, como atrás se referiu, a qualidade dos resultados era fraca. Por outro lado, com o georadar foi possível identificar vinte e três zonas de penetração adicionais, localizadas entre secções escavadas. Além disso, foi ainda possível determinar a extensão horizontal das zonas de penetração – Figura 3.2.

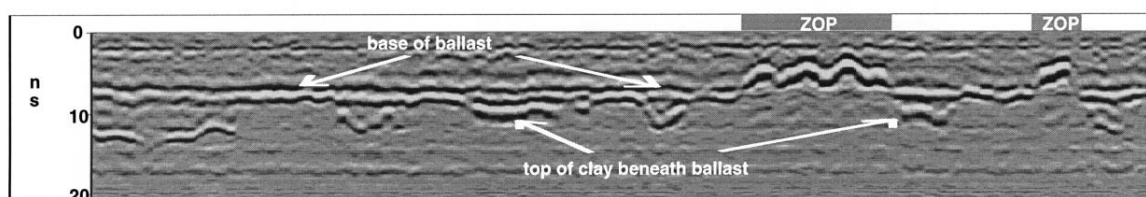


Fig.3.2 – Secção de 200 m de resultados obtidos com o georadar, onde são visíveis duas zonas de penetração (ZOP) [18].

Hugenschmidt conclui que o ensaio com georadar é muito útil na inspecção de infra-estruturas ferroviárias, embora como técnica complementar aos métodos tradicionais. Para o autor, o georadar provou ser um método fiável para a identificação de zonas de penetração do balastro no material do subsolo. Segundo este, as condições locais das zonas não identificadas explicam os fracos resultados aí obtidos.

3.2.5. OLHOEFT, SELIG [19]

O estudo desenvolvido pelos autores, em 2002, visava analisar a adequabilidade do georadar a quatro objectivos concretos: 1) identificar a influência da subestrutura no processo de manutenção de ferrovias; 2) avaliação do estado *in situ* dos componentes da via privilegiando métodos não destrutivos; 3) identificar os mecanismos de deterioração do balastro e estabelecer métodos de previsão do seu tempo de vida; 4) estudar os efeitos da acção do gelo nas ferrovias.

Até à data, as tentativas feitas haviam sido apenas em parte bem sucedidas. Por um lado, o efeito das travessas era muito forte, por outro era relativamente difícil adquirir resultados de uma forma eficaz (incluindo o processamento automático destes).

O equipamento utilizado pelos autores consistia num par de antenas suspensas de 1 GHz e uma unidade de controlo SIR-8, da GSSI. As antenas foram montadas 48 a 56 cm acima dos carris, na traseira de um veículo modificado para uso em carris. Os autores recorreram igualmente a um dispositivo de medição de distâncias, o qual provou ter uma precisão de 0,4%. Embora fossem admissíveis velocidades de ensaio superiores, um dos objectivos do ensaio consistia em localizar drenos e outros objectos de dimensão reduzida, pelo que se fixou uma velocidade de ensaio de 10 mph (cerca de 16 km/h).

Segundo os autores, os melhores resultados (com menor interferência dos carris) foram obtidos com polarização das antenas na perpendicular aos carris – polarização transversal. O melhoramento das imagens foi alcançado, sobretudo, pela remoção do ruído provocado pelos carris.

Neste artigo, os autores referem a importância da modelação e interpretação quantitativas dos dados, de forma a determinar as causas de defeitos na via. O seu objectivo é conseguir modelar automaticamente as propriedades eléctricas do solo, extraindo informações como densidade e teor em água.

Contudo, o tamanho e a rugosidade das partículas que compõem o balastro inviabilizam o processo de calibração com placa metálica. Os autores viram-se forçados a escavar secções transversais pontualmente, ao longo da via, para conseguirem verificar e calibrar os resultados obtidos. Por outro lado, a dimensão das partículas que compõem o balastro provoca dispersão das ondas, para a frequência de 1 GHz. Por esta razão, torna-se complicado distinguir os efeitos da densidade e do teor em água. Segundo os autores, seria necessário recorrer a frequências mais baixas (300 ou 400 MHz), comparando os resultados obtidos com os adquiridos com antenas de 1 GHz. No entanto, frequências baixas são mais sensíveis aos efeitos dos carris e das travessas, dificultando a sua calibração.

Neste texto, os autores optaram por analisar mudanças relativas ao longo de uma secção de dados de 1 GHz, assumindo que estas seriam causadas por alterações no teor em água (uma vez que este varia mais rapidamente do que a densidade).

Os autores concluem que, correctamente aplicado, o georadar fornece imagens transversais, longitudinais e em profundidade da subestrutura da via, úteis na identificação de variações nas condições desta. Recolhendo dados com três antenas com polarização transversal (nos bordos e no centro da via) o processo revela-se mais rápido do que realizando múltiplas passagens e obtém-se uma correlação mais precisa entre os dados.

3.2.6. BROUGH *ET AL.* [20]

Neste artigo, publicado em 2003, os autores resumem a investigação realizada numa ferrovia britânica onde se suspeitava que as elevadas necessidades de manutenção seriam causadas por más condições da subestrutura. O troço de via analisado, de cerca de 230 m, situa-se perto da estação de Leominster, em Herefordshire e foi escolhido pelo facto de exigir trabalhos de manutenção com muita frequência.

A escolha dos ensaios adequados ao estudo foi feita seguindo as orientações descritas em Brough [16] – Anexo III. Assim, numa primeira fase, foram realizadas sondagens, DP's (Penetrómetro Dinâmico) e ensaios com georadar com o objectivo de identificar zonas da subestrutura de baixa resistência e realçar possíveis causas de assentamentos diferenciais na via; posteriormente, nos locais identificados como possíveis zonas de risco, realizaram-se CPT's (Cone Penetrométrico) e ensaios com ABS (*Automatic Ballast Sampler*) e FWD (*Falling Weight Deflectometer*), visando confirmar o tipo e causa do defeito encontrado e fornecer informação geotécnica mais detalhada, a qual pudesse ser usada para determinar procedimentos de manutenção adequados.

O georadar foi aplicado durante a primeira fase com o objectivo de indicar a profundidade do balastro, bem como o seu estado. Os autores basearam a sua interpretação em dois pontos:

- A camada sobre a qual o balastro fora construído era argilosa, pelo que seriam de esperar fortes reflexões da base do balastro; caso o balastro se tenha deteriorado ou contaminado, as reflexões não serão tão nítidas;
- Em zonas com elevado grau de contaminação, será expectável uma reflexão acentuada mas a uma profundidade menor, uma vez que deverá existir uma interface nítida.

A recolha dos dados foi feita recorrendo a uma antena de 900 MHz, a uma velocidade de ensaio de 1 km/h. A velocidade adoptada foi condicionada, principalmente, pelo facto de apenas se recolherem dados entre travessas.

No local investigado, os resultados obtidos com o georadar corroboraram os das sondagens e viriam a ser confirmados pelas amostras recolhidas com ABS. A interpretação dos resultados sugeria que a extensão de balastro contaminado seria maior que aquela investigada, provando o potencial do georadar neste tipo de investigações (principalmente em relação às sondagens). Embora os autores reconheçam as vantagens do método, nomeadamente na redução do número de sondagens ou secções escavadas, realçam também que não se deve abdicar totalmente destes. Neste estudo, foi através da análise das sondagens que se avaliou a posição do nível freático, justificando a pontual realização destas.

3.2.7. HYSLIP ET AL. [21]

Neste texto, datado de 2003, os autores exploram o tema abordado nesta dissertação: a aplicação do georadar a ferrovias, nomeadamente na avaliação do estado da subestrutura da via. Após descreverem o equipamento mais adequado para o objectivo, os autores apresentam aquele que usaram nos exemplos apresentados.

No que concerne à escolha das antenas, os autores salientam dois aspectos importantes a ter em conta: 1) a frequência de operação da antena, a qual ditará a resolução das imagens e a profundidade de penetração do sinal; 2) o tipo de antena (suspensa ou com contacto na superfície).

Dado que a subestrutura de uma ferrovia não é, em geral, muito profunda e atendendo às interferências provocadas pelos carris e pelas travessas, estes autores sugerem a utilização de antenas de 1 GHz. Visando permitir velocidades de ensaio superiores e evitar possíveis obstáculos da via (cruzamentos, dispositivos de mudança de via, lixo, etc.), recomendam igualmente o recurso a antenas suspensas.

Nos exemplos apresentados, os autores recorreram a um conjunto de três pares de antenas suspensas de 1 GHz, localizadas de ambos os lados e entre os carris, permitindo analisar a via, quer longitudinalmente, quer transversalmente. Para facilitar o posicionamento preciso das medições realizadas, o equipamento de ensaio incluía um GPS, um instrumento de medição de distâncias e um sistema digital de vídeo.

Salientando o facto de o georadar reconhecer facilmente diferenças nos materiais, causadas por variações no tipo de solo e seu teor em água, os autores consideram que este é um método capaz de localizar bolsas de água e zonas de contaminação do balastro por partículas de granulometria fina (qualitativa e quantitativamente), bem como identificar a base do balastro. Referem, igualmente, a necessidade de calibrar os resultados com amostras de solo, de forma a determinar os valores dieléctricos das diversas camadas da subestrutura. Sugerem também, que os resultados do georadar poderão ser usados para desenvolvimento de indicadores de estado ou índices de desempenho, principalmente em investigações sobre grandes áreas onde a alocação de recursos deve ser cuidadosamente analisada. Estes índices (Figura 3.3) facilitarão a identificação das zonas mais problemáticas do perfil, bem como a extensão relativa dos defeitos. Assim, o georadar permitirá avaliar possíveis medidas de reabilitação, como o dimensionamento de um sistema de drenagem mais apropriado.

Hyslip *et al.* destacam o esforço desenvolvido no sentido da automatização das medições e das técnicas de análise. Segundo os mesmos, os índices de estado assim obtidos (relativos a aspectos como as interfaces entre as camadas, o teor em água ou o grau de contaminação) permitirão otimizar os custos de manutenção, a segurança da via e reduzir as interrupções ao tráfego.

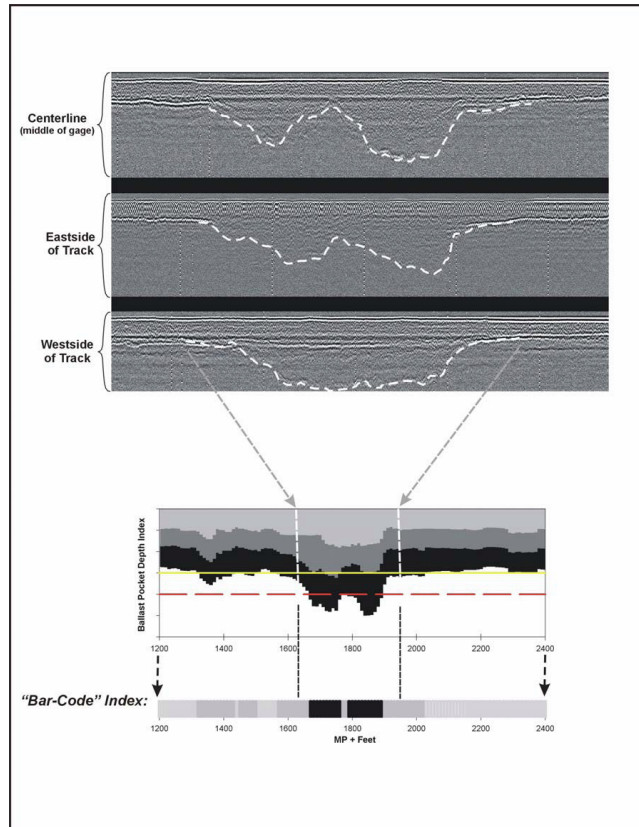


Fig.3.3 – Índice de estado do subsolo, baseado nos resultados do georadar sobre a profundidade da bolsa de balastro [21].

Neste texto, os autores concluem que o georadar é um método extremamente vantajoso, com o potencial de medir: 1) espessuras das camadas da subestrutura; 2) teor em água e compacidade do balastro, sub-balastro e coroamento; 3) bolsas de água causadas por má drenagem; 4) camadas de baixa resistência, fruto do elevado teor em água; 5) camadas da subestrutura não uniformes e variações no estado destas ao longo da via; 6) grau de contaminação do balastro.

3.2.8. CARPENTER *ET AL.* [22]

Nos últimos anos, os engenheiros geotécnicos envolvidos em projectos de ferrovias têm vindo a reconhecer os benefícios de produtos geossintéticos especialmente concebidos para as necessidades encontradas durante a construção e reparação da fundação das vias. Neste artigo, publicado em 2004, os autores descrevem um destes geossintéticos – Terram PW5, o qual foi desenvolvido para ser facilmente identificável pelo georadar. Assim, sugerem a possibilidade de: 1) confirmar, após a construção, que o geossintético foi correctamente instalado; 2) determinar a profundidade do balastro acima do geossintético; 3) monitorizar zonas da fundação susceptíveis a assentamentos (por exemplo zonas sobre horizontes calcários ou antigas minas).

Atendendo ao elevado custo da manutenção e à necessidade de fazer um planeamento com alguns meses de avanço, a possibilidade de rever periodicamente e com precisão o estado da via constitui, para os autores, a principal vantagem do georadar. Por esta razão, os mesmos esperam que a aplicação deste método aumente.

Os autores referem que a precisão na determinação da profundidade do balastro depende, exclusivamente, da correcta avaliação da velocidade de propagação das ondas neste. Esta, por sua vez, é influenciada por diversas propriedades do balastro (heterogeneidade, quantidade de partículas finas, variações no teor em água ou o efeito do gelo no Inverno). Segundo os autores, no pior cenário, as variações nestas propriedades poderão resultar em imprecisões de 25% na estimativa da profundidade.

O Terram PW5 foi originalmente concebido devido à necessidade de detectar geossintéticos enterrados, quer para garantir a sua correcta instalação, quer para identificar o seu tipo e extensão. Inicialmente, os autores ponderaram revestir completamente o geossintético com um agente reflector electromagnético. Embora este procedimento garantisse a “visibilidade” deste para o georadar (ou qualquer outro método electromagnético), não assegurava a sua distinção em relação a outros materiais fortemente reflectores. Seria necessário garantir que o geossintético fosse facilmente identificável pelo georadar. Assim, a solução adoptada passava pela adição de fitas de material condutivo no interior do geossintético, as quais originariam reflexões hiperbólicas no perfil. Estas fitas poderão ser dispostas com espaçamentos distintos, criando um “código de barras” identificativo do geossintético utilizado. Para além das vantagens acima referidas, este método permite igualmente a realização do ensaio durante períodos de chuva. No entanto, os autores referem que será necessário incorporar este tipo de análise em *software* de processamento de dados do georadar, sendo esta a principal desvantagem encontrada.

Neste artigo, os autores apresentam resultados de ensaios laboratoriais realizados para testar o protótipo do PW5. O modelo consistia numa caixa de dimensões $2 \times 0,4 \times 0,4$ m³ construída sem materiais metálicos, na qual foi colocada uma amostra do geossintético coberta por 50 mm de balastro granítico. O equipamento de georadar utilizado consistia numa unidade de controlo PulseEKKO 1000, da Sensors and Software, com antenas de 900 MHz e 1,2 GHz. Nestas condições, a reflexão da base do balastro (o qual se encontrava em boas condições) era perfeitamente visível, assim como a zona de tangência desta com o vértice da hipérbole, correspondente à fita reflectora inserida no PW5, permitindo determinar a profundidade do geossintético com uma margem de erro nunca superior a 1%.

Impulsionados pelos excelentes resultados laboratoriais, os autores testaram o método num troço de via especificamente concebido para este propósito. O perfil da ferrovia consistia numa fina camada não uniforme de areia (entre 120 a 240 mm) coberta por 500 mm de balastro. O subsolo da ferrovia era de natureza argilosa. O PW5 foi instalado quer na base do balastro (com tiras reflectoras em duas posições) quer na base da camada arenosa (com apenas uma tira reflectora) – Figura 3.4. Embora os testes iniciais tenham sido realizados sem via, tanto as travessas como os carris viriam a ser instalados mais tarde.

Cada uma das hipérbolas correspondentes às tiras reflectoras era visível no perfil, em particular a central (situada na interface entre o balastro e a camada de areia) e os respectivos vértices convergiam perfeitamente com as reflexões nas interfaces entre camadas. A velocidade de propagação das ondas no balastro foi calculada através da hipérbole central, resultando numa espessura de balastro de 500 mm (em conformidade com a espessura real).

Os autores defendem que a aplicação do PW5 numa ferrovia favorece e impulsiona o planeamento da manutenção, maximizando a sua eficácia económica. Por exemplo, em zonas de contaminação do balastro por material do subsolo, serão visíveis duas reflexões: a primeira correspondente à tira

reflectora no interior do PW5, a qual indicará a posição inicial do balastro e a segunda relativa à posição real do balastro. Desta forma será possível avaliar rapidamente o grau de contaminação do balastro e a necessidade de trabalhos de reabilitação. Os autores referem igualmente a possibilidade de identificar bolsas de água na base do balastro, subsidência na fundação da via e, possivelmente, avaliar a eficácia de técnicas de compactação do balastro.

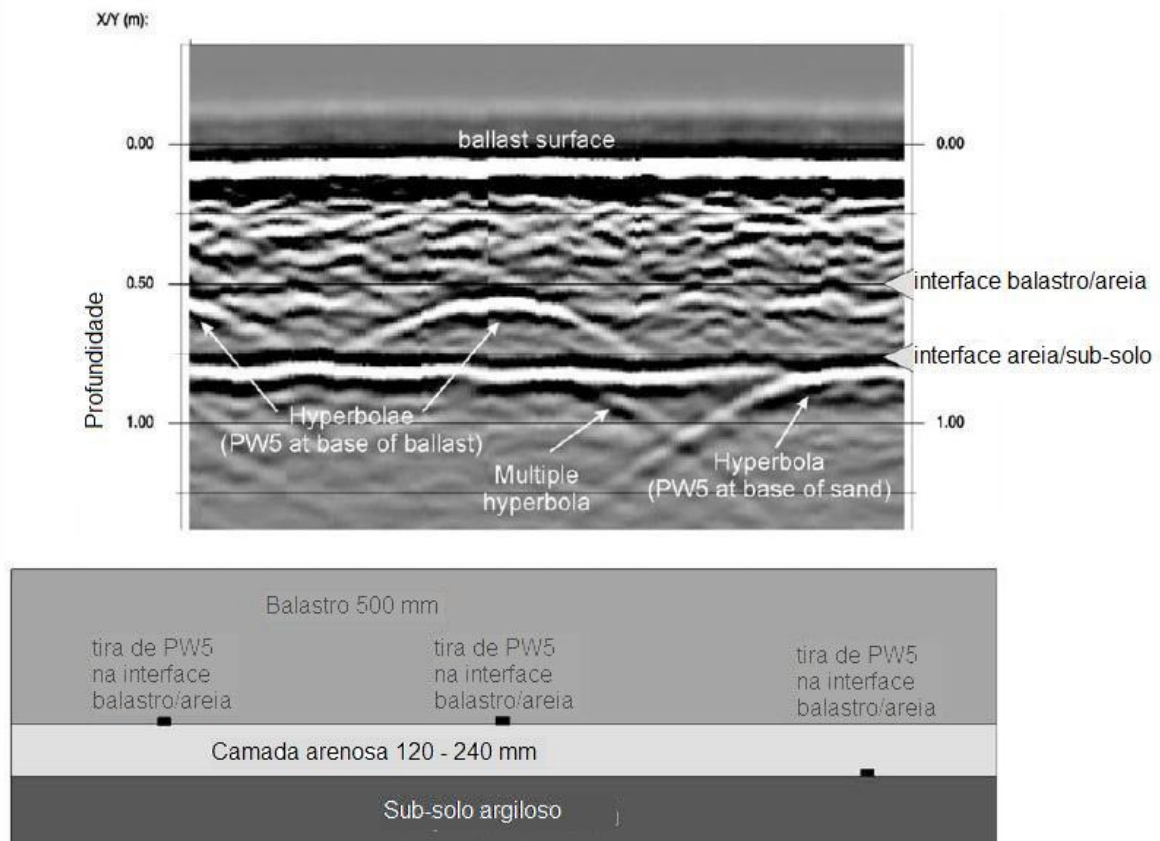


Fig.3.4 – Radargrama obtido num troço de via onde foi instalado o PW5. Atente-se nas posições relativas das tiras reflectoras e das hipérbolas correspondentes no perfil [22].

3.2.9. HUGENSCHMIDT [23]

Este caso de estudo apresentado por Hugenschmidt descreve a aplicação do georadar para inspeção de vias embebidas em betão, numa zona industrial. Neste local verificavam-se vários defeitos, cujas causas não foram determinadas pelos métodos tradicionais, razão pela qual se recorreu ao georadar.

O estudo descrito, realizado em Janeiro de 2004, envolveu duas pessoas e durou 4 horas. Em cada um dos 4 trechos, com cerca de 300 m de extensão cada, foram recolhidos resultados ao longo de duas linhas de medição. O equipamento utilizado consistia numa antena de 400 MHz da GSSI movida manualmente e controlada por uma unidade GSSI, SIR-20.

Complementarmente aos ensaios realizados com o georadar, abriu-se uma vala de 5 m, para validação dos resultados. Os resultados permitiram retirar as seguintes ilações:

- A espessura de betão ronda os 40 cm (valor de projecto), não se verificando variações significativas de espessura;
- O georadar não conseguiu identificar cavidades na interface betão/sub-balastro (duas sondagens foram realizadas em locais onde se suspeitava da presença de cavidades; no entanto, nenhuma delas confirmou a sua existência);
- As reflexões individuais dos varões de reforço eram claramente visíveis, à profundidade de 38 cm e espaçadas entre 15 e 20 cm (a resolução das antenas não permitiu determinar o diâmetro dos varões);
- O tipo e espaçamento das travessas (desconhecidos até à altura);
- Não foi possível, recorrendo ao georadar, determinar conclusivamente a natureza da união entre carris (travessa contínua ou blocos duplos unidos por barras metálicas), embora os resultados sugerissem que as reflexões seriam causadas por barras metálicas;
- Um espaçamento entre barras metálicas consecutivas de 1,8 m, confirmado pelas sondagens;
- Não existem blocos de betão singulares adicionais para além daqueles unidos por barras metálicas (travessas);
- A vala aberta revelou espaçamentos entre 3 barras metálicas de 1,8 e 1,95, sem nenhum bloco singular intermédio, confirmando os resultados obtidos pelo georadar.

3.2.10. FORTUNATO [5]

Na sua tese de doutoramento, datada de 2005, o autor refere alguns aspectos relativos ao uso do georadar num subtroço da Linha do Norte, em Portugal. Esta linha ferroviária une as cidades do Porto e de Lisboa, foi construída entre 1856 e 1930 e é a mais importante linha portuguesa.

Os estudos desenvolvidos, pioneiros em Portugal na aplicação do método a ferrovias, visavam determinar a espessura das camadas de apoio da via (balastro/balastro contaminado e sub-balastro). Neste contexto, o autor apresenta também os estudos realizados em laboratório, para determinação das constantes dieléctricas, e os desenvolvidos num trecho experimental, para avaliação da adequação do equipamento e sistematização dos procedimentos de ensaio.

Para a recolha de dados, foi usada uma unidade de controlo SIR-10 e duas antenas com contacto na superfície, uma de 500 MHz e outra de 900 MHz, da GSSI. O autor esperava, assim, obter resoluções de 6 cm e 3 cm e profundidades máximas de penetração de 2 m e 1 m, respectivamente.

Para poder calibrar posteriormente os resultados, foram determinados em laboratório os valores dieléctricos dos diversos materiais que se esperava encontrar na via férrea. Para tal, construiu-se uma caixa cúbica em madeira, no fundo da qual se colocou uma placa metálica. Sobre a placa foram compactados sucessivamente os vários materiais a ensaiar. Os valores dieléctricos determinados são apresentados na Tabela 3.2. Note-se que os obtidos com a antena de 500 MHz são superiores aos obtidos com a de 900 MHz.

Posteriormente, construiu-se um modelo com balastro contaminado com solos, sobreposto por sub-balastro granítico com 10 cm de espessura. O objectivo era avaliar se as antenas eram capazes de medir a espessura da camada superficial. No que concerne à antena de 500 MHz, não foi possível detectar a existência desta camada. No entanto, utilizando a antena de 900 MHz, verificou-se ser possível reconhecer a camada, embora o autor saliente o fato de não se ter conseguido determinar a sua espessura. O mesmo conclui que seria útil dispor de uma antena de maior frequência, caso existam camadas pouco espessas.

Tabela 3.2 – Constante dieléctrica dos materiais ensaiados [5]

Material	Estado	Constante dieléctrica	
		Antena 500 MHz	Antena 900 MHz
Balastro calcário limpo	Seco	5,3	5,0
	Molhado	7,2	6,4
Balastro granítico limpo	Seco	4,3	3,7
	Molhado	4,8	3,8
Balastro calcário contaminado com granulometria fina	Seco	15,4	12,5
	Molhado	16,0	13,2
Balastro calcário contaminado com granulometria média	Seco	10,0	9,6
	Molhado	11,2	11,2
Balastro calcário contaminado com granulometria grossa	Seco	7,6	6,4
	Molhado	8,6	7,5
Sub-balastro granítico	w=1,7%	-	6,4
	w=3,1%	-	7,1
	w=4,6%	-	8,5

Mais tarde, realizaram-se ensaios num provete de grandes dimensões, com o principal objectivo de avaliar a possibilidade de detectar a interface entre a camada de balastro contaminado e o solo de fundação. Utilizando a antena de 900 MHz, não só foi possível identificar a interface, como a estimativa da profundidade conduziu a valores muito próximos do exacto. Como sucedeu anteriormente, a antena de 500 MHz não permitiu identificar o limite inferior da camada de balastro contaminado.

A aplicação do georadar na Linha do Norte começou por se realizar num trecho experimental, entre o km 167,900 e o km 168,000, que se encontrava fora de serviço. O autor utilizou ambas as antenas (500 e 900 MHz), realizando diversas passagens com cada uma delas, quer longitudinal quer transversalmente, fazendo variar a velocidade de ensaio, a taxa de emissão e a distância em planta aos carris. Após o processamento dos dados brutos, obtiveram-se as imagens da Figura 3.5 (já com a interpretação realizada sobre estas). Com base nos valores dieléctricos calculados em laboratório e na informação de uma sondagem realizada no local, o autor estimou as espessuras das camadas de balastro limpo e balastro contaminado, obtendo, para a antena de 900 MHz, 0,43 m e 0,15 m e para a antena de 500 MHz, 0,49 m e 0,14 m. As espessuras medidas aquando da realização da sondagem foram, respectivamente, cerca de 0,40-0,45 m e 0,15-0,20 m, corroborando os resultados obtidos pelo georadar.

Para avaliar a influência dos carris e das travessas, o autor realizou complementarmente um ensaio junto ao carril. Comparativamente, neste novo perfil não é possível identificar a primeira interface, devido à sobreposição das hipérbolas de grandes dimensões provocadas pelas travessas. A influência dos carris foi notória nos perfis transversais, condicionando as imagens em profundidade.

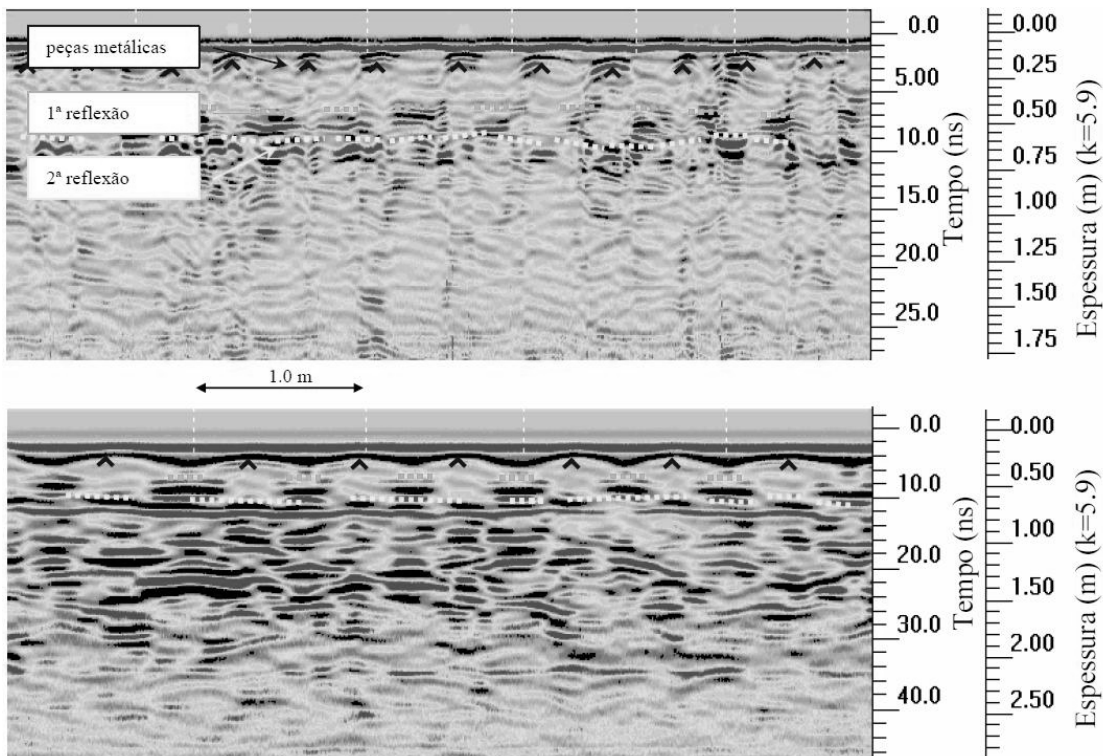


Fig.3.5 – Interpretação de imagens de radar obtidas numa zona do trecho experimental. No topo, usando a antena de 900 MHz, em baixo usando a antena de 500 MHz [5].

Para que fosse possível a aplicação sistemática do equipamento disponível a troços de grandes extensões, foi projectado e construído um veículo de transporte para as antenas. Neste veículo, as antenas foram posicionadas a cerca de 20 cm do balastro e foi acoplada uma roda com um conta-rotações para referenciação dos perfis – Figura 3.6. A velocidade de ensaio foi de, aproximadamente, 20 km/h.

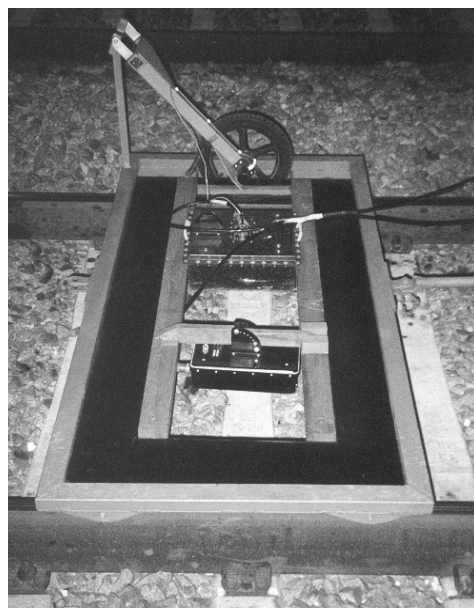


Fig.3.6 – Aspecto do veículo construído para deslocar as antenas [5].

A conversão dos resultados dos perfis para valores de espessuras foi feita com recurso aos valores dieléctricos determinados em laboratório, sendo posteriormente confrontados com informação disponível de sondagens. Embora seja óbvia uma maior resolução da antena de 900 MHz, ambas as antenas conduziram a resultados semelhantes aos determinados *in situ*. O desvio médio entre a espessura total estimada e a observada foi de 7%, para camadas calcárias, e 6%, para zonas de balastro granítico (nestas zonas, em 30 % dos casos não foi possível identificar a fronteira entre as camadas de balastro limpo e contaminado).

Finalmente, Fortunato relata a aplicação do método num trecho de transição de uma zona da via antiga para uma recente – Figura 3.7. Embora, em ambos os casos, fosse visível a reflexão da base do balastro, na zona nova a imagem é mais nítida. Por outro lado, analisando a parte do perfil correspondente à zona nova, é possível determinar a profundidade das interfaces balastro/sub-balastro e sub-balastro/solo de fundação. Aplicando os valores dieléctricos determinados laboratorialmente, obtêm-se espessuras de, respectivamente, 0,56 e 0,28 m, valores relativamente próximos dos de projecto (0,50 e 0,30 m).

O autor salienta que os resultados obtidos em laboratório, no modelo experimental, no trecho de ensaio, nos trechos de via antiga e nos trechos de transição, demonstram a grande utilidade do georadar no âmbito da renovação, conservação e reabilitação de ferrovias.

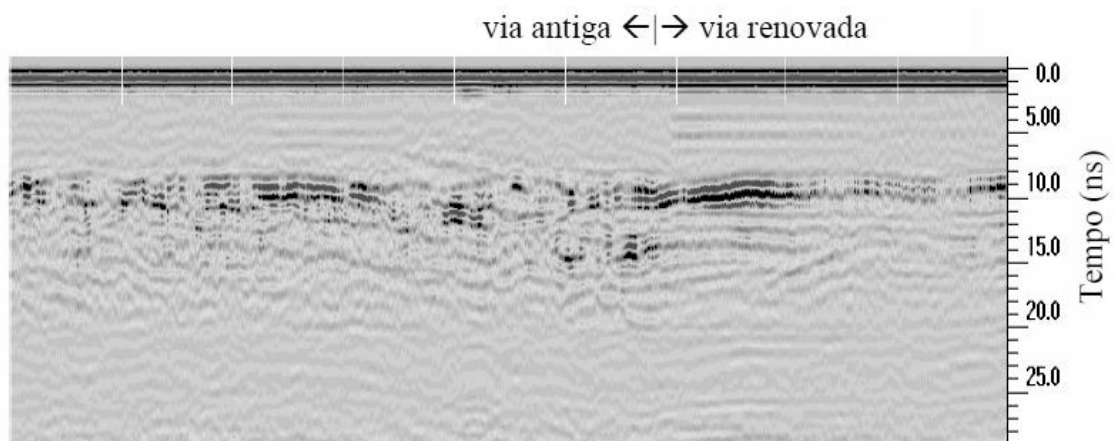


Fig.3.7 – Perfil de radar numa zona de transição da via antiga para a via renovada [5].

3.2.11. ROBERTS *ET AL.* [24] E ROBERTS *ET AL.* [25]

Este artigo descreve o estudo realizado pelos autores, utilizando um sistema de georadar com antenas suspensas de frequência 2 GHz, na avaliação do estado das camadas de balastro, sub-balastro e coroamento em alguns troços de ferrovias norte-americanas. O estudo foi conduzido entre Janeiro de 2005 e Setembro de 2006, nos estados de Massachusetts, Nebraska, Colorado e Wyoming, num total de cerca de 238 km de via.

Desde cedo tornou-se evidente para os autores que a recente antena de 2 GHz era bastante sensível aos vazios entre partículas de balastro (surgiam no perfil reflexões significativas provocadas por estes) – ver Figura 3.8. Este factor constitui a base do trabalho realizado, cujo objectivo passava pelo desenvolvimento de metodologias de processamento de dados de forma a extrair informação sobre o grau de contaminação do balastro. A técnica encontrada consistia em construir uma envolvente de amplitudes de reflexão, implementando-a numa sequência de processamento automático.

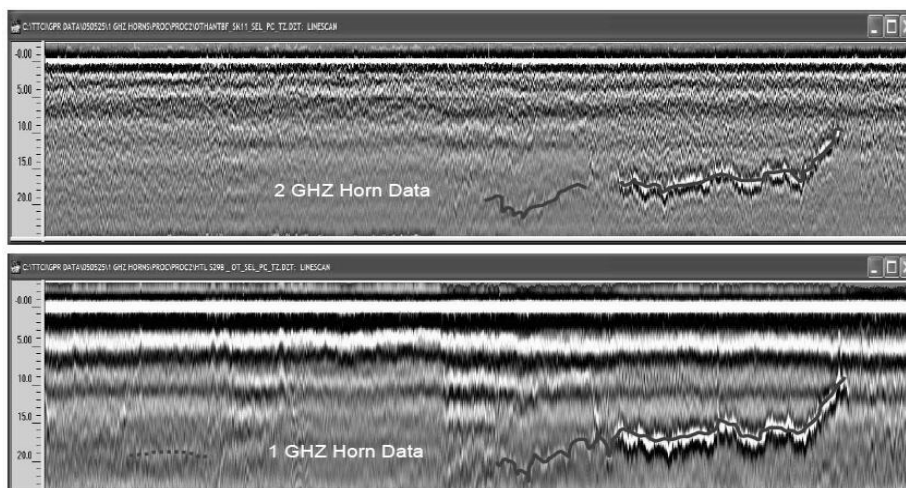


Fig.3.8 – Comparação entre os resultados obtidos, para a mesma secção, com antenas de 2 GHz (topo) e 1 GHz (em baixo) [24].

Para a recolha de dados, usaram-se três antenas: duas delas posicionadas a cerca de 15 cm do limite das travessas (em betão) e uma a meia distância dos carris. Os autores salientam que o algoritmo de processamento não produz bons resultados para a antena central, com travessas em betão.

Na Tabela 3.3 apresenta-se um resumo das áreas investigadas, a informação recolhida no local e o número de km para os quais existem registos de reabilitação.

Tabela 3.3 – Resumo das áreas investigadas e da informação recolhida no local [24]

Localização	km de dados analisados	Tipo de plataforma	Sondagens e secções transversais	# de zonas lamacentas	Registos de manutenção em km
Colorado	24,1	Areia	12	0	-
Providence	47,5	Areia/argila	0	5	47,5
West Bill	110	Areia	5	260	35,2
Crawford	56,2	Argila expansiva	0	54	0,9

A ferrovia situada perto da localidade de Pueblo, Colorado, revelou-se ideal para comparação dos resultados do georadar com a informação recolhida *in situ*. Num perfil de georadar, relativo a cerca de 60 m de via, a reflexão provocada pelo balastro limpo é perfeitamente visível, mesmo com pouco processamento dos dados. A espessura da camada de balastro limpo calculada a partir destes resultados veio a ser confirmada em três das quatro sondagens realizadas neste troço, sendo que os autores não conseguiram explicar a discrepância encontrada na quarta sondagem.

Em Providence, os resultados do georadar continham, em algumas zonas, fortes horizontes reflectores, os quais sugerem a presença de uma interface clara entre dois níveis com graus de saturação distintos. Neste local, o recurso ao georadar permitiu identificar zonas com elevado grau de saturação e sua extensão e localizar locais lamacentos.

Nos 110 km de via investigados em West Bill, os autores possuíam uma grande quantidade de registos de manutenção. Nestas secções da via o grau de contaminação era muito menor que nas restantes,

sendo isso visível no perfil obtido. As zonas lamacentas encontradas durante a inspeção visual foram igualmente nítidas nos resultados do georadar. O perfil viria a mostrar que estes locais correspondem a zonas de balastro contaminado perto da superfície. Os autores salientam, assim, a excelente correspondência entre os resultados obtidos pelo georadar e a informação recolhida no local.

Finalmente, nas duas secções analisadas pelos autores relativas a Crawford, a maior parte dos resultados evidencia pouca contaminação do balastro, concentrada em alguns locais. Na única secção da via sobre a qual incidiram trabalhos de manutenção no passado, o georadar mostra balastro limpo e alguma contaminação pontual (a qual os autores não conseguem explicar). De um modo geral, era evidente uma boa concordância entre os dados do georadar e a informação obtida no local.

3.2.12. LOIZOS, PLATI [26]

O estudo desenvolvido pelos autores em 2007 diz respeito a ensaios realizados em rodovias. No entanto, os objectivos e resultados obtidos têm bastante interesse no âmbito desta dissertação. Na sua investigação, realizada no *Laboratory of Highway Engineering da National Technical University of Athens*, Loizos e Plati testaram, simultaneamente, duas frequências centrais de ensaio, 1GHz e 2 GHz, com o intuito de avaliar comparativamente a sua precisão.

Os ensaios foram realizados num troço de cerca de 450 m de extensão, de uma via com muito tráfego, a qual havia sido recentemente sujeita a trabalhos de manutenção, com duas antenas suspensas (uma de 1 GHz e outra de 2 GHz) a uma altura de 50 cm do pavimento.

Após sujeitos às mesmas técnicas de processamento, os resultados obtidos para as duas frequências revelaram diferenças significativas, tal como verificaram Roberts *et al.* [26] – Figura 3.8. Embora a antena de 2 GHz seja mais nítida, não permite visualizar as camadas mais profundas da estrutura.

Na figura 3.9 apresenta-se a comparação entre as espessuras estimadas para as duas frequências e a espessura medida nas sondagens realizadas (4 no total), para as camadas em mistura betuminosa. Em todos os casos, as espessuras estimadas são superiores à real, sendo que a antena de 2 GHz conduz aos valores mais elevados. No entanto, se considerarmos apenas a camada de desgaste – Figura 3.9 – a precisão da antena de 2 GHz é muito maior.

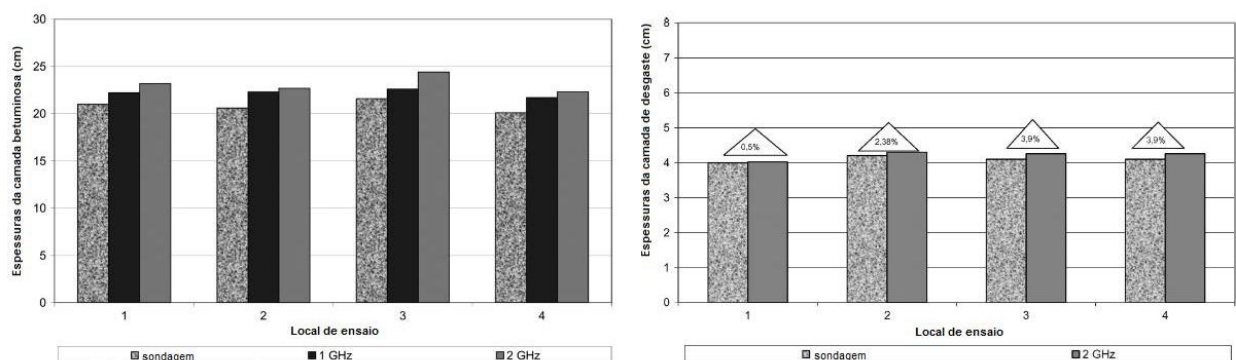


Fig.3.9 – Comparação entre as espessuras estimadas com a informação obtida nas sondagens. À esquerda, entre sondagens, 1GHz e 2 GHz, para o conjunto de camadas em mistura betuminosa; à direita, entre sondagens e 2 GHz, para a camada de desgaste [26].

Os autores referem que estes erros poderiam ser menores se a informação das sondagens fosse utilizada para calibração dos resultados. Os mesmos concluem que a antena de 2 GHz é útil para investigações mais superficiais e que, para camadas inferiores, é preferível usar-se a antena de 1 GHz.

3.2.13. MALA [27]

Esta aplicação da companhia sueca Mala, disponibilizada pela mesma no seu *site*, visa mostrar o potencial do seu equipamento na aplicação a ferrovias. O problema analisado consiste na identificação de uma camada de separação instalada na interface entre o balastro e a plataforma, colocada de forma a prevenir a contaminação do balastro por partículas finas. Nesta ferrovia suspeitava-se da existência de zonas onde esta não foi instalada ou onde deveria ser reposta.

Durante a recolha de dados usaram-se duas antenas de 800 MHz, colocadas de cada lado dos carris, e uma antena de 500 MHz, no centro da via, ligadas a uma unidade de controlo RAMAC CUII. Esta disposição das antenas permitiu mapear a via transversalmente. Colocou-se a antena de 500 MHz no centro da via por se admitir menor interferência das travessas (em betão armado) nesta frequência. As antenas foram posicionadas a 45 cm de altura em relação à via, permitindo uma velocidade de ensaio constante de 20 km/h.

Durante o processamento dos dados, os autores notaram que a antena de 500 MHz não atingia profundidades muito maiores que as antenas de 800 MHz, além de conduzir a resultados com qualidade inferior, pelo que foram negligenciados. A comparação entre os resultados obtidos com as antenas de 800 MHz e amostras do terreno, evidenciou uma boa concordância. Na Figura 3.10 é apresentada uma secção de 1 km de via, com a respectiva interpretação.

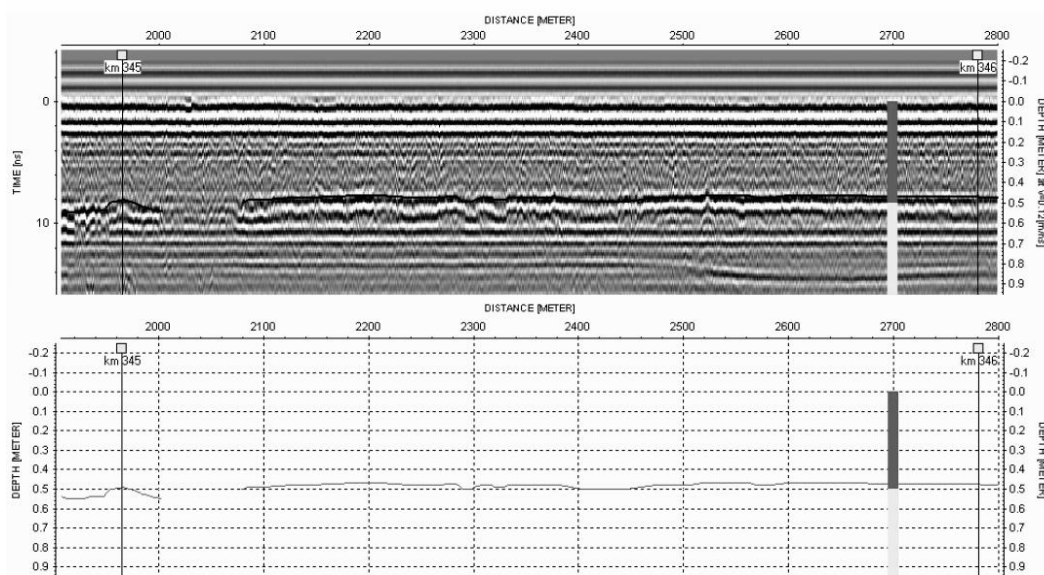


Fig.3.10 – Em cima, os resultados de georadar para uma secção da via. Em baixo, a interpretação feita com base nestes resultados. Aos 2700 m encontram-se os resultados da sondagem realizada [27].

Com base nos resultados obtidos, os autores puderam identificar claramente a espessura da camada de balastro e a presença da camada de separação. Os mesmos salientam a excelente qualidade das imagens, mesmo estando as antenas posicionadas a 45 cm de altura.

4

RESULTADOS DE ENSAIOS NUM CASO DE ESTUDO

4.1. INTRODUÇÃO

Nos capítulos anteriores referiram-se diversas vantagens associadas à aplicação do georadar a infra-estruturas ferroviárias, as quais conferem a este método características únicas sobre as técnicas de ensaio mais comuns. Por outro lado, salientaram-se também as principais limitações do método. Em 2.1 referiu-se que as dificuldades no processamento e na interpretação dos resultados constituem a principal causa para o lento desenvolvimento do georadar.

Este é, de resto, um dos poucos métodos de ensaio que requer a presença de um técnico especializado para o processamento e interpretação dos resultados. Mais do que da condição da subestrutura investigada, o grau de confiança da interpretação é função da experiência do operador e do intérprete, bem como do seu conhecimento da estrutura, de forma a interpretar correctamente os significados das reflexões. Saarenketo [7] refere que é impossível dominar o método e, principalmente, a interpretação dos resultados com base em conhecimentos teóricos. Apenas com experiência prática exaustiva se conseguem resultados credíveis.

Neste capítulo é apresentado um estudo realizado sobre as camadas de sub-balastro e coroamento de um troço de ferrovia em construção, que fará parte da Linha do Sul. Foram dois os propósitos deste estudo: 1) verificar se seria possível utilizar o georadar para determinar a espessura das camadas de sub-balastro e coroamento; 2) adquirir experiência de utilização do equipamento e de interpretação dos resultados.

Os ensaios *in situ* foram conduzidos em meados de Março de 2009, pelo LNEC. O facto de as camadas estarem concluídas não permitiu a aplicação de métodos de prospecção invasivos, pelo que não houve possibilidade de realizar furos de sondagem para aferir os resultados obtidos pelo georadar. Contudo, estavam disponíveis as características físicas e mecânicas dos materiais e das camadas, obtidas durante a construção. Estes elementos foram disponibilizados pela REFER, entidade à qual o autor agradece a permissão para o seu uso e inclusão no trabalho.

Para a determinação dos valores dieléctricos dos materiais usados nas várias camadas foi construído, nos finais de Maio de 2009, numa fossa de ensaios no LNEC, um trecho experimental com materiais semelhantes aos utilizados na obra. Os ensaios realizados neste trecho, bem como a calibração e posterior interpretação dos resultados de campo, serão também abordados neste capítulo.

4.2. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

O troço de ferrovia analisado insere-se no projecto de uma variante, na Linha do Sul, entre os PKs 59+000 (à saída da estação do Pinheiro) e 94+500. Este novo traçado, de via única, tem uma extensão aproximada de 29 km e, segundo o Projecto de Execução da obra, seguirá as recomendações técnicas da ficha UIC 719R, 2ª edição de 01-01-1994.

Aquando da realização dos ensaios, a via ainda se encontrava em construção, não existindo nem camada de balastro nem superestrutura.

As características de projecto das diversas camadas da plataforma são apresentadas na Tabela 4.1. Pelo facto de não haver disponibilidade de solos da classe QS3, foi colocado um agregado britado de granulometria extensa (ABGE) na camada de coroamento. Saliente-se igualmente que, embora a espessura mínima, recomendada na ficha UIC 719R, para a camada de sub-balastro seja de 0,145 m, adoptou-se uma espessura de 0,30 m para manter a uniformidade com outros trechos da Linha do Sul.

Tabela 4.1 – Alguns dos requisitos mínimos de Projecto relativos às camadas estruturais da plataforma.

Camada	Classes dos materiais*	Espessura (m)	Material/tratamento utilizado	Compactação relativa - Ensaio Proctor Modificado (OPM)
Sub-balastro	-	0,30	ABGE	≥ 98%
	QS2	0,20	ABGE	
Coroamento	QS1	0,35	ABGE	≥ 97%
	QS0	0,50	ABGE	
Aterro (PSA)	-	0,50	Equivalente a QS2	
Escavação (Fundação)	-	0,30	Escarificação dos solos	≥ 95%

* Segundo a ficha UIC 719R

O troço analisado neste trabalho situa-se entre o km 3+000 e o km 4+000 desta variante. A escolha do troço prende-se com o facto de, ao longo da sua extensão, ocorrerem mudanças quer de espessura quer de material utilizado nas várias camadas da plataforma – Figura 4.1. Durante a interpretação dos resultados, procurar-se-ão identificar as singularidades presentes nos PKs 3+325, 3+500, 3+650 e 3+950, assim como o geotêxtil colocado sobre a camada de enrocamento de dimensão 0/200 mm (entre o km 3+650 e o km 3+950).

A camada de sub-balastro, em particular, foi construída em duas sub-camadas, da seguinte forma:

- Uma primeira camada de base, com 0,15 m de espessura, utilizando um ABGE granítico proveniente da pedreira da Mota-Engil, entre o km 3+000 e o km 3+325 e um ABGE calcário proveniente da pedreira da Sobrissul, nos restantes 675 m;
- Uma segunda camada, sobre esta, também com 0,15 m de espessura, construída com ABGE proveniente da pedreira da Mota-Engil.

A camada de sub-balastro foi compactada com cilindro vibrador de rasto liso (6 passagens) e cilindro de pneus (6 passagens).

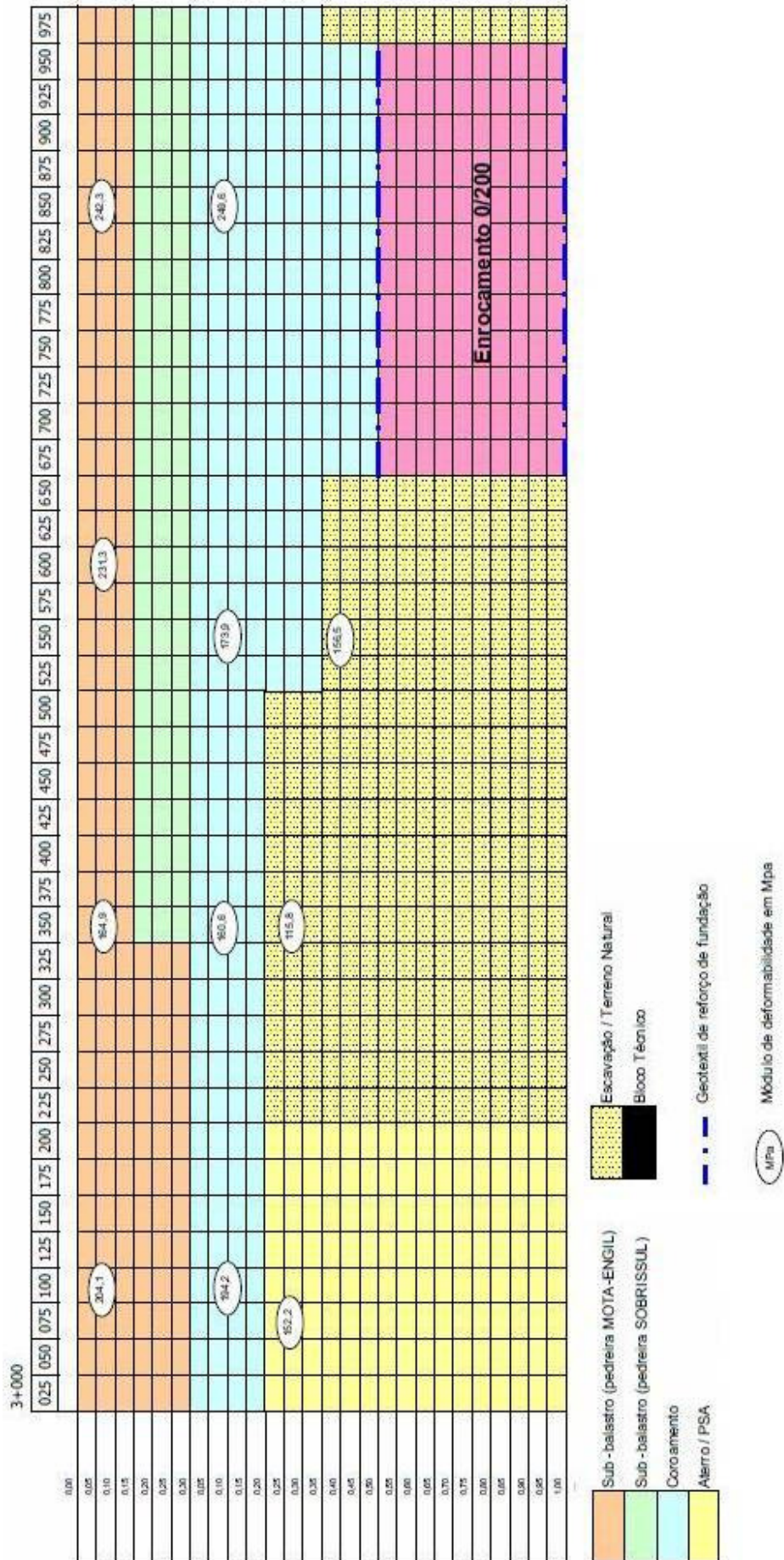


Figura 4.1 - Perfil do tratamento da plataforma entre o km 3+000 e o km 4+000.

No Anexo IV apresentam-se as características físicas e mecânicas dos materiais usados nas camadas de coroamento e sub-balastro. Na Tabela IV.1 apresentam-se as características do ABGE usado na camada de coroamento e na Tabela IV.2 as características dos agregados provenientes das duas pedreiras referidas e usados nas camadas de sub-balastro.

4.3. PROCEDIMENTOS DE ENSAIO E EQUIPAMENTO UTILIZADO

O equipamento de ensaio utilizado consistiu numa unidade de controlo SIR-20 e dois conjuntos de antenas suspensas, de 1 GHz e 2 GHz de frequência, respectivamente (modelos 4108 e 4105). Estas foram posicionadas recorrendo a um sistema de vigas em fibra de vidro e atreladas a um veículo rodoviário (atendendo à inexistência da superestrutura de via férrea não foi necessário adaptar o veículo usado em inspeções rodoviárias às condições de uma ferrovia) – Figura 4.2. Para controlar o intervalo de amostragem dos ensaios foi acoplada ao sistema uma roda medidora.



Fig.4.2 – Sistema de posicionamento das antenas durante o ensaio.

Foram aplicados filtros verticais FIR e IIR, do tipo *low-pass* e *high-pass* da seguinte forma: para as antenas de 1 GHz, filtros FIR de 3000 MHz e 500 MHz e filtros IIR de 1000 MHz e 100 MHz, respectivamente; para as antenas de 2 GHz, filtros FIR de 5000 MHz e 500 MHz e filtros IIR de 3000 MHz e 100 MHz.

Previamente à realização dos ensaios foram criados ficheiros de calibração, correspondentes aos testes de calibração e de estimação da altura das antenas e da reflexão da onda através de placa metálica – Figura 4.3. Embora, nas condições laboratoriais, o ensaio tenha sido localizado, realizou-se também o teste de calibração com a placa metálica para ter em conta possíveis erros associados à espessura da placa metálica.

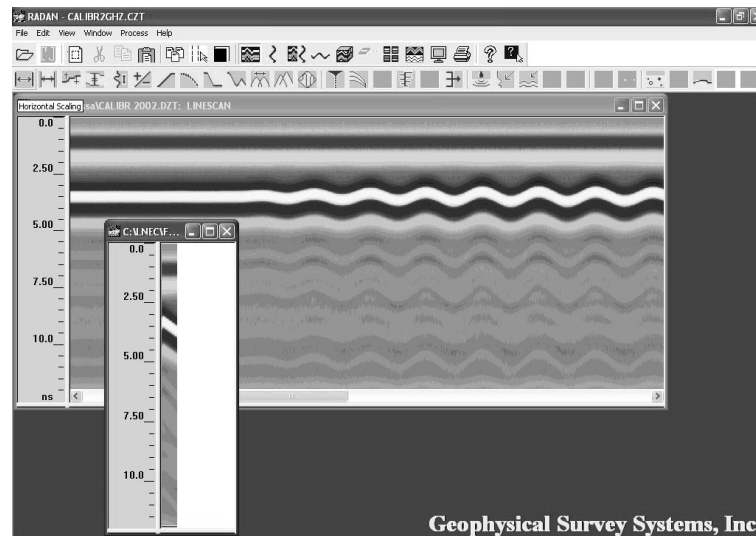


Fig.4.3 – Exemplo de um ficheiro de calibração para as antenas de 2 GHz; são visíveis as ondulações causadas pela calibração das antenas.

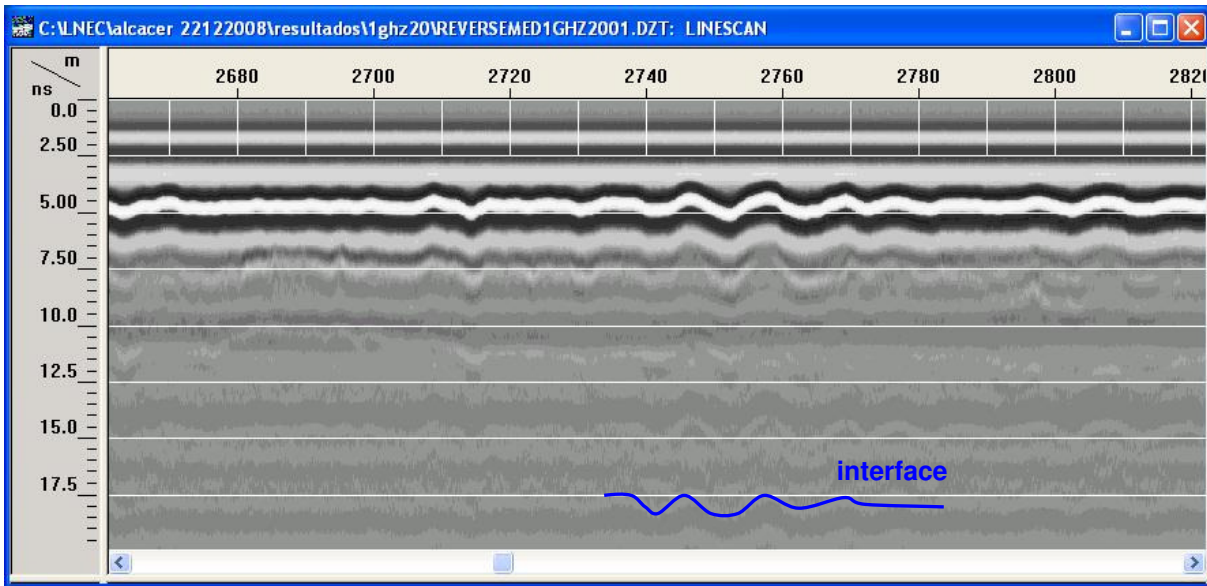
A janela de visualização de resultados foi definida em função da antena e da profundidade de penetração pretendida, visando:

- “Apanhar” a primeira reflexão – operando com antenas suspensas, o primeiro pico de reflexão não é provocado pela placa metálica mas sim pela camada de ar. Para garantir a eficácia do ficheiro de calibração é essencial garantir que esta reflexão surge na janela de visualização;
- Prevenir a perda de informação que ocorre caso a amplitude da onda ultrapasse a janela de medição – recomenda-se, tanto durante a calibração com a placa metálica como no ensaio, que a amplitude máxima da onda corresponda a $2/3$ da amplitude máxima da janela;
- Permitir uma optimização da profundidade de penetração das ondas – assim, sugere-se que o pico de reflexão da placa metálica se situe a cerca de $1/3$ da profundidade de penetração máxima da janela.

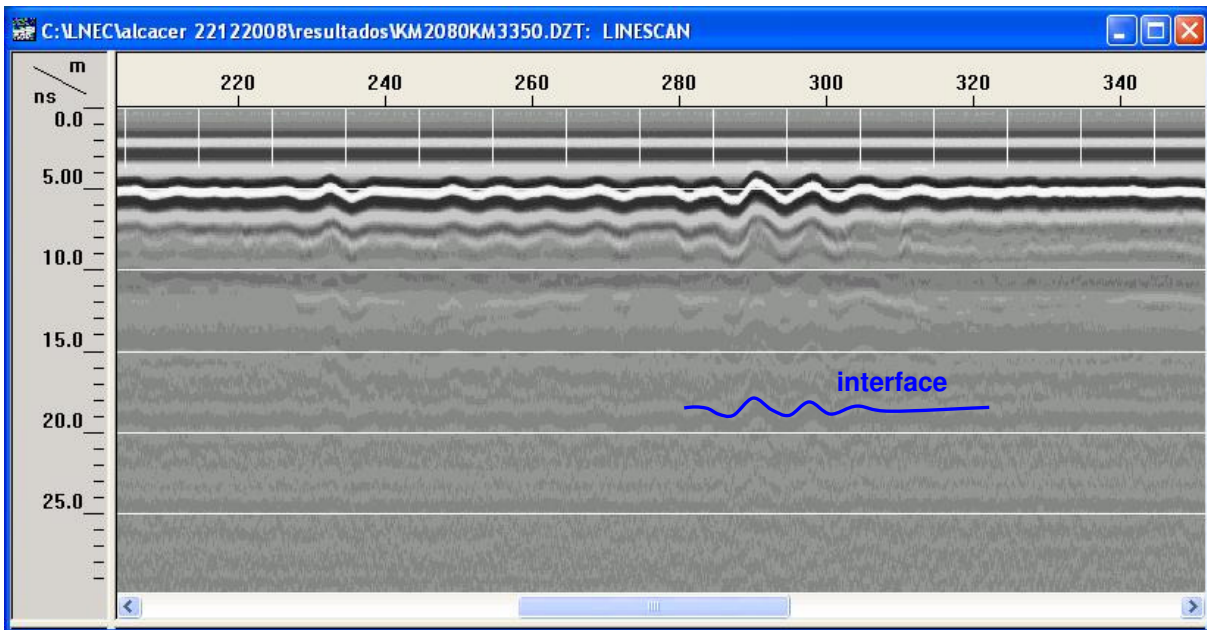
No âmbito deste estudo, foram utilizadas diversas janelas de visualização, as quais funcionam como “cortes” aplicados ao perfil. Como tal, aumentando a janela de amostragem, aumenta-se a profundidade de penetração da onda. No entanto, dependendo da frequência das antenas e do meio a percorrer, a partir de uma certa profundidade, a informação obtida é escassa, dado que a onda se dissipa ou é absorvida pelo meio. Na Figura 4.4 apresentam-se exemplos de registos obtidos com janelas de visualização de 20 e 30 ns. O aumento da janela de amostragem, normalmente de 20 ns no caso das antenas de 1 GHz, justifica-se principalmente nas situações onde é visível a presença de uma interface no limite da janela. Nesse caso, com uma janela de 30 ns é, geralmente, possível identificar a continuidade da mesma interface em profundidade.

Durante o ensaio *in situ* foram testadas várias densidades de amostragem, com o intuito de avaliar o número de leituras por metro ideal para este tipo de medições. De facto, é necessário ter em conta que se a densidade de amostragem for baixa, a dimensão dos ficheiros recolhidos será menor. Contudo, quanto menor a amostragem maior será a possibilidade de descurar elementos ou informação localizada. Assim, a densidade de amostragem a utilizar deverá adequar-se aos objectivos do estudo.

Foram igualmente testadas antenas com duas frequências distintas, procurando comprovar as vantagens e limitações de cada uma.



a)



b)

Fig.4.4 – Registos obtidos na mesma secção para janelas de visualização de: a) 20ns; b) 30ns

4.4. ENSAIOS LABORATORIAIS

A calibração dos dados obtidos durante o ensaio *in situ* através da realização de sondagens e poços [6], ou através da estimativa da constante dielétrica dos materiais utilizados em condições controladas [5], em trechos experimentais, é da maior importância.

Neste trabalho, para a determinação do valor dielétrico dos materiais usados, foi construído um trecho experimental, numa fossa de ensaios. Para tal, escavou-se uma secção rectangular de, aproximadamente, 2 m² de superfície e 0,30 m de profundidade, no fundo da qual se colocou uma placa de zinco. Sobre a placa metálica compactaram-se os materiais anteriormente descritos, seguindo

as orientações definidas em Projecto, obtendo-se duas secções de, aproximadamente, 1 m² cada, como apresentado na Figura 4.5 (à esquerda). Para a determinação do teor em água dos materiais, na altura do ensaio, recorreu-se a um gamadensímetro, como ilustrado na Figura 4.5 (à direita), obtendo-se valores de $w=5,1\%$ para o agregado granítico, associado a uma compactação relativa de 100%, e $w=3,9\%$ para o agregado calcário, associado a uma compactação relativa de 101%. Obtiveram-se, assim, valores de compactação semelhantes aos observados em campo.



Fig.4.5 – Execução do trecho experimental. À esquerda um aspecto da compactação, onde A representa o material calcário e B o material granítico. À direita a determinação do teor em água através de um gamadensímetro.

Em cada uma das secções do trecho foram experimentados os dois conjuntos de antenas. Durante a recolha de dados, a amplitude da onda reflectida na placa metálica subjacente ao material em análise, era maior no caso do sub-balastro granítico do que no caso do sub-balastro calcário – Figura 4.6. De igual forma, também as leituras efectuadas com as antenas de 2 GHz conduziram a resultados mais nítidos.

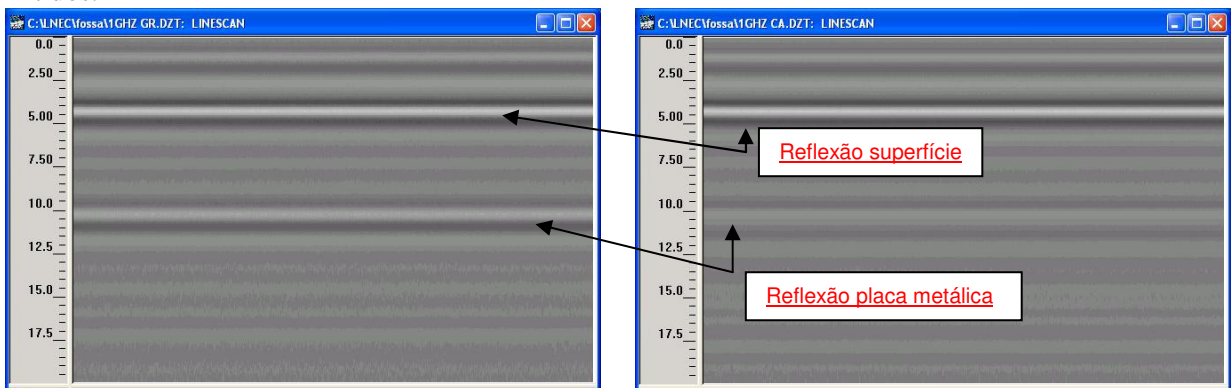


Fig.4.6 – Onda reflectida na placa metálica subjacente ao material em análise: sub-balastro granítico (esquerda) e sub-balastro calcário (direita)

Durante o processamento destes resultados, após a criação dos ficheiros de calibração, aplicaram-se as seguintes técnicas de processamento (ilustradas na Figura 4.7):

- Identificação das reflexões (*Reflection Picking*) – consiste na identificação, no perfil, das reflexões mais importantes; este procedimento pode ser automático ou manual (neste caso o intérprete definirá um intervalo de espessuras estimadas para várias camadas);
- Interpretação das camadas (*Layer Interpretation*) – consiste na interpretação das reflexões anteriormente identificadas como interfaces, definindo a posição das várias camadas ao longo do perfil; durante este processo o intérprete deverá indicar o número de camadas e

o respectivo intervalo de profundidades (interpretação automática) ou o valor da velocidade de propagação das ondas para as diversas camadas (interpretação manual).

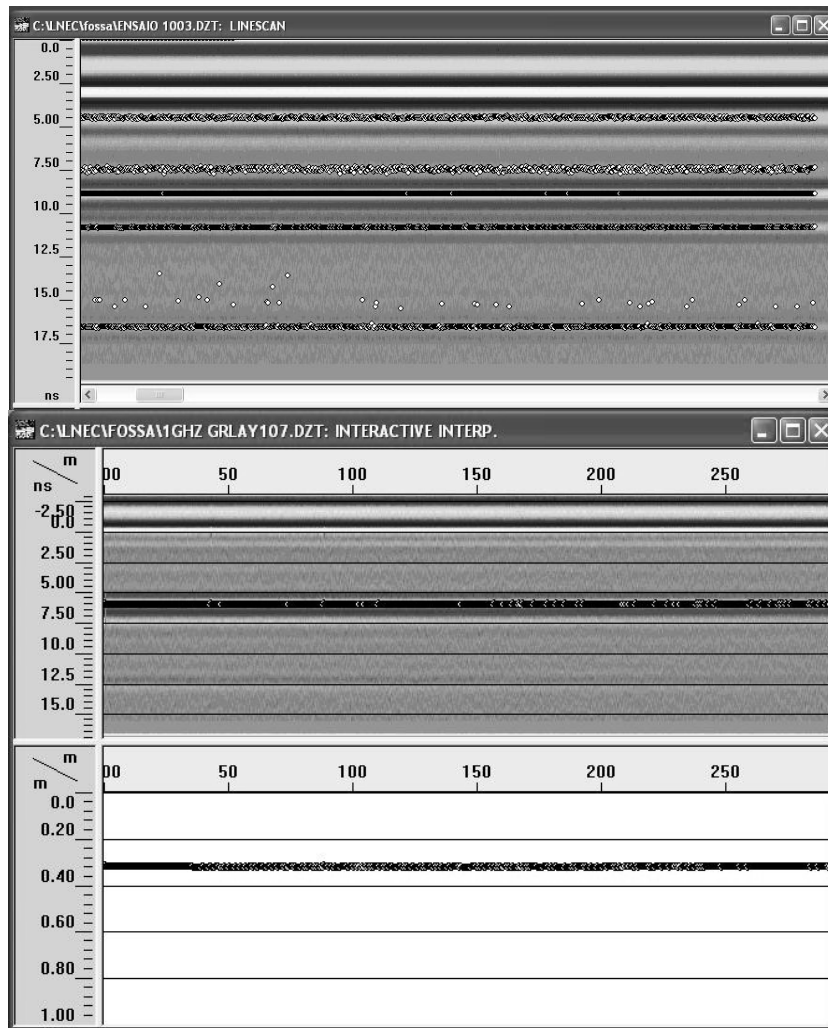


Fig.4.7 – Processamento dos resultados laboratoriais. Em cima um exemplo da fase de identificação das reflexões e em baixo de interpretação das camadas.

Os resultados finais, para cada um dos materiais, em termos de espessura da camada, de velocidade de propagação das ondas e constante dielétrica, calculada resolvendo a expressão (6) em função de ϵ , são apresentados na Tabela 4.2. Recorde-se que a espessura da camada era conhecida.

Na secção de agregado granítico, os resultados foram muito satisfatórios, verificando-se uma excelente concordância entre os valores obtidos para ambas as frequências. Na secção de agregado calcário, embora os valores obtidos recorrendo às antenas de 2 GHz sejam superiores aos relativos às antenas de 1 GHz, o desvio é relativamente baixo, podendo-se concluir que os resultados são igualmente satisfatórios.

Assim, para efeitos de calibração dos resultados obtidos *in situ*, o valor dielétrico admitido para o agregado granítico foi 7,86 e para o agregado calcário 10,20 (valor médio dos valores obtidos pelos dois pares de antenas).

Tabela 4.2 – Valores laboratoriais de velocidade de propagação, espessura e valor dielétrico.

Material	Frequência das antenas	Espessura da camada (m)	Velocidade de propagação das ondas (m/ns)	Valor dielétrico
Agregado granítico	1 GHz	0,32	0,107	7,86
	2 GHz	0,32	0,107	7,86
Agregado calcário	1 GHz	0,29	0,096	9,77
	2 GHz	0,29	0,092	10,63

4.5. ENSAIOS REALIZADOS *IN SITU*

4.5.1. RESULTADOS OBTIDOS COM ANTENAS DE 1 GHz

Em alguns casos, o processamento automático dos dados conduziu a resultados satisfatórios. Em certas zonas, como a evidenciada na Figura 4.8, todas as interfaces são claramente discerníveis a profundidades muito próximas das de Projecto. Por exemplo, é possível observar as interfaces entre camadas do mesmo material, compactadas em fases distintas.

Noutras zonas, como a apresentada na Figura 4.9, embora sejam claramente visíveis quer a superfície quer a primeira interface (entre sub-balastro granítico e calcário), a partir dos 0,30 m, sensivelmente ao nível da interface sub-balastro/coroamento, a imagem torna-se confusa.

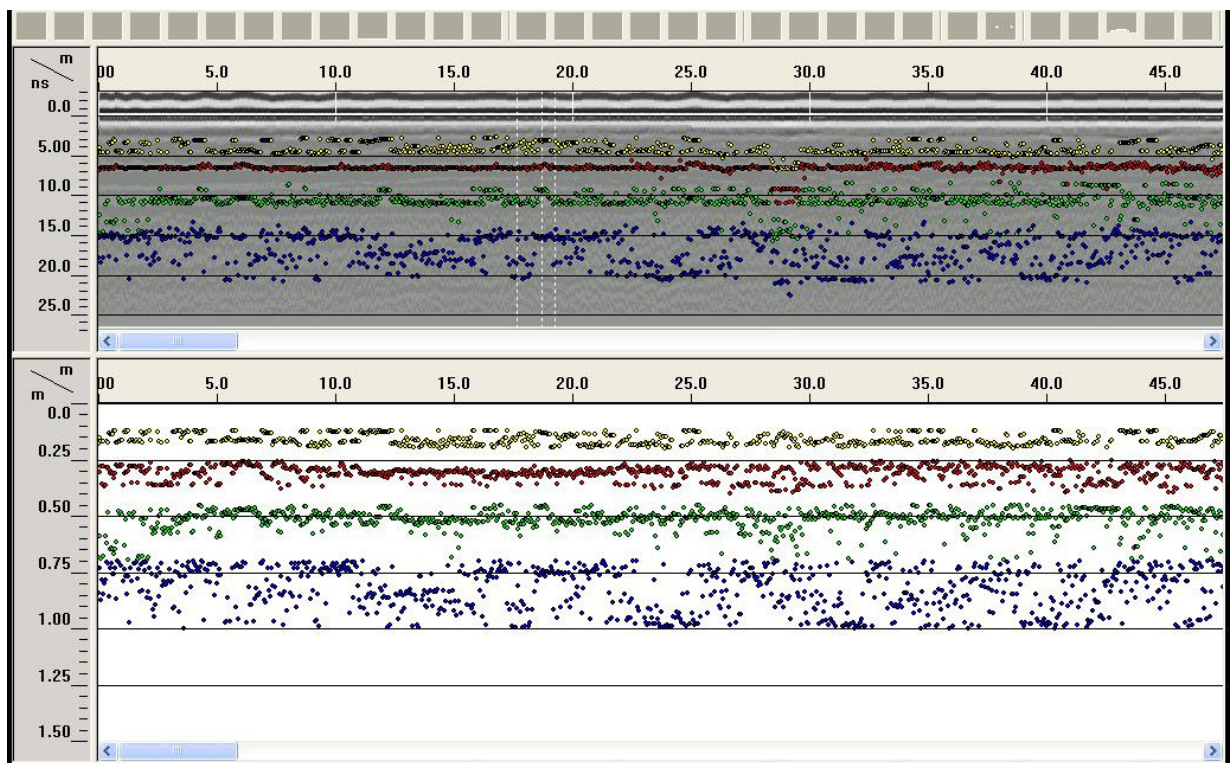


Fig.4.8 – Interpretação automática inicial dos resultados obtidos com as antenas de 1 GHz, entre o km 3+775 e o km 3+825.

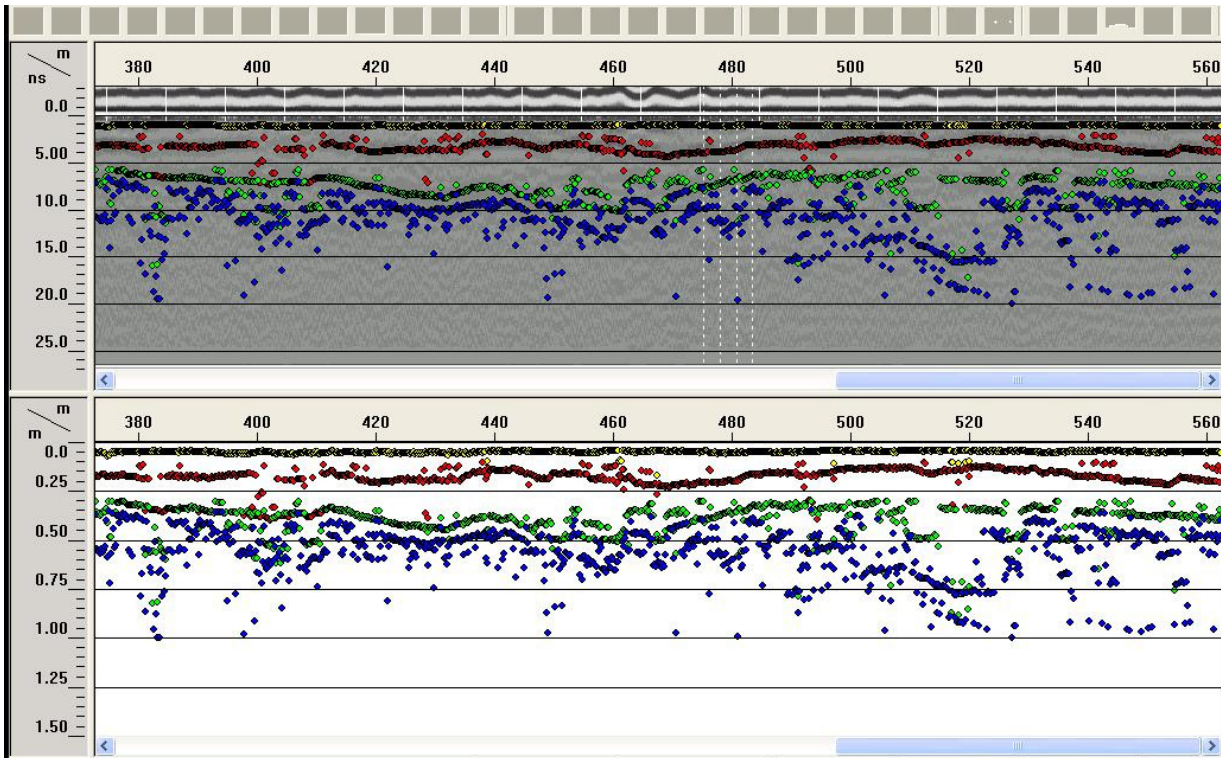


Fig.4.9 – Interpretação automática inicial dos resultados obtidos com as antenas de 1 GHz, entre o km 3+350 e o km 3+550.

Como foi referido várias vezes ao longo deste trabalho, a recolha de informação no terreno é essencial para que se faça uma correcta interpretação dos dados. Assim, procedeu-se a uma nova interpretação, desta feita manual, utilizando as constantes dieléctricas dos dois agregados determinadas previamente em laboratório.

Nas Figuras 4.10 e 4.11 apresentam-se os perfis obtidos, junto ao km 3+325, utilizando a interpretação automática, para medições realizadas com 20 e 50 leituras por metro, respectivamente. Atendendo à informação já apresentada, ao km 3+325 ocorre uma alteração na camada de sub-balastro. De acordo com o Projecto, a partir desta secção passa a ser utilizado um agregado calcário na primeira camada de sub-balastro (15 cm de espessura de material colocado sobre o coroamento) e, sobre esta, uma camada de 15 cm de agregado granítico. A localização desta transição não é evidente nos ficheiros obtidos com a antena de 1 GHz. Assim, na tentativa de identificar esta alteração, foram utilizadas as antenas de 2 GHz, apresentando-se os resultados em 4.5.2.

Na Figura 4.12 apresentam-se os ficheiros obtidos com a antena de 1 GHz, após a interpretação manual, tendo em conta as propriedades dieléctricas dos materiais, determinadas em laboratório. Para a camada de coroamento, foi realizada uma calibração com base na espessura de Projecto, tendo sido adoptado para a velocidade da onda o valor de 0,096 m/ns (equivalente a um valor dieléctrico de 9,77).

A análise destas figuras permite concluir que, em geral, os valores das espessuras determinados corroboram os definidos em Projecto.

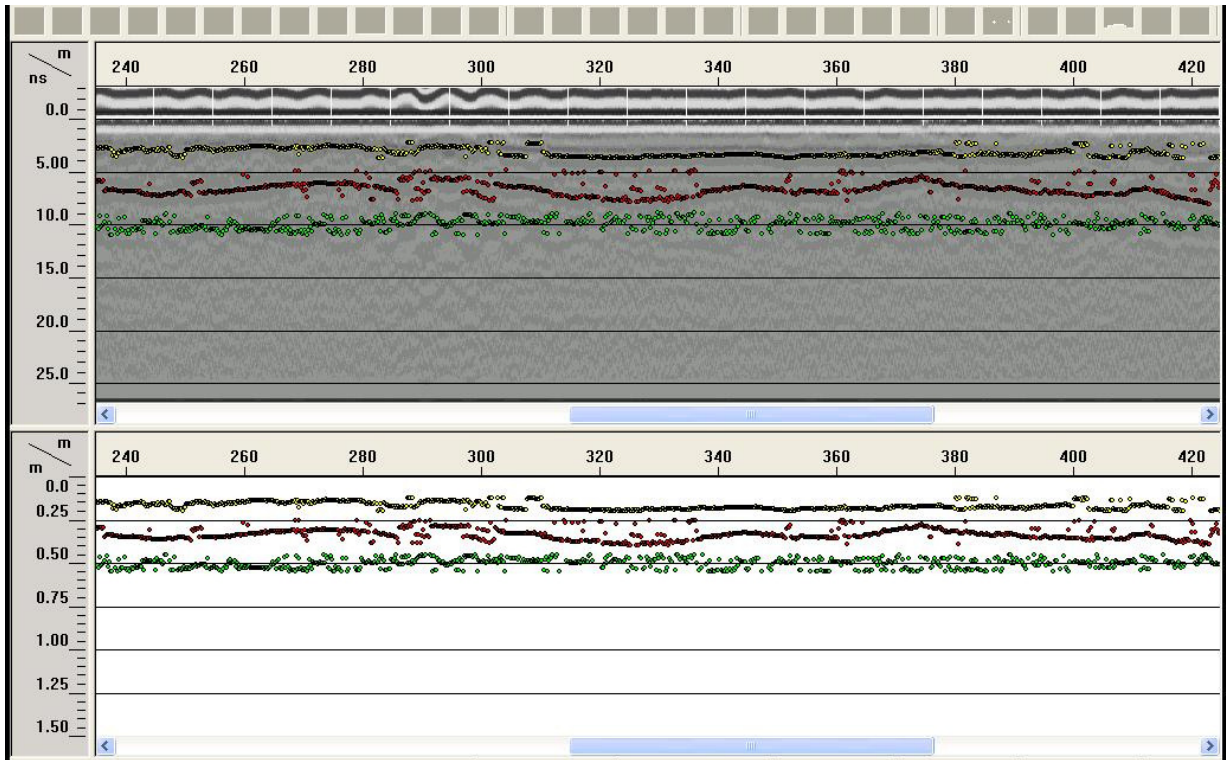


Fig.4.10 – Interpretação do perfil no km 3+325; medições feitas com as antenas de 1 GHz e uma densidade de amostragem de 20 leituras por metro.

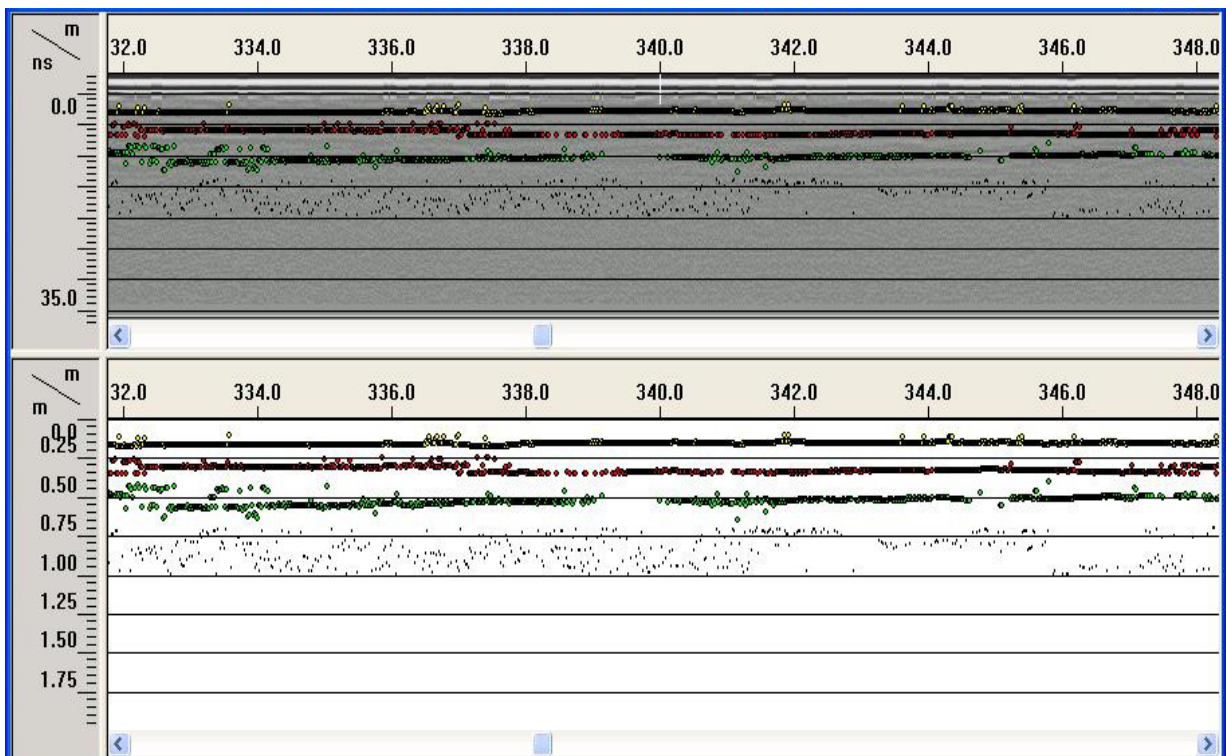


Fig.4.11 – Interpretação do perfil no km 3+325; medições feitas com as antenas de 1 GHz e uma densidade de amostragem de 50 leituras por metro.

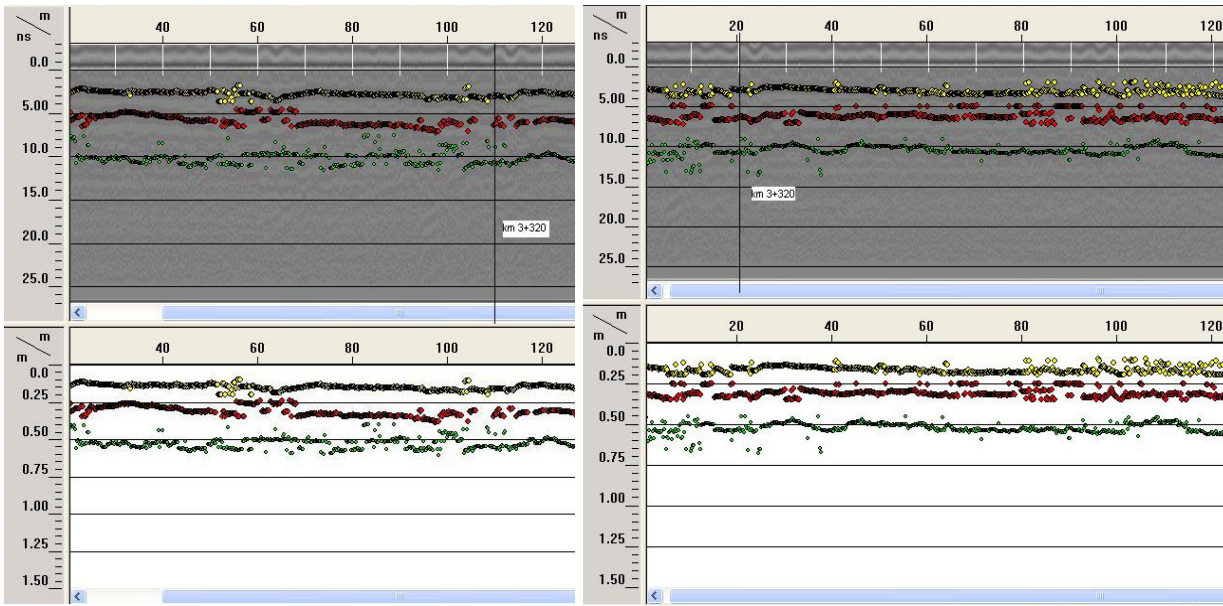


Fig.4.12 – Resultados obtidos com o radar no km 3+325, após calibração das velocidades de onda obtidas em trecho experimental, na zona com sub-balastro granítico (esquerda) e na zona com sub-balastro granítico e calcário (direita).

A partir do km 3+500 e até ao km 3+650, o Projecto especifica que a espessura da camada de coroamento será de 0,35 m, passando a interface entre esta camada e o terreno natural, gradualmente, dos 0,50 para os 0,65 m de profundidade. Na Figura 4.13 apresenta-se a interpretação do perfil obtido com 20 leituras por metro, identificando 4 camadas. Aproximadamente ao km 3+510 é visível uma zona de transição na quarta camada, corroborando, com muita precisão, os valores de Projecto.

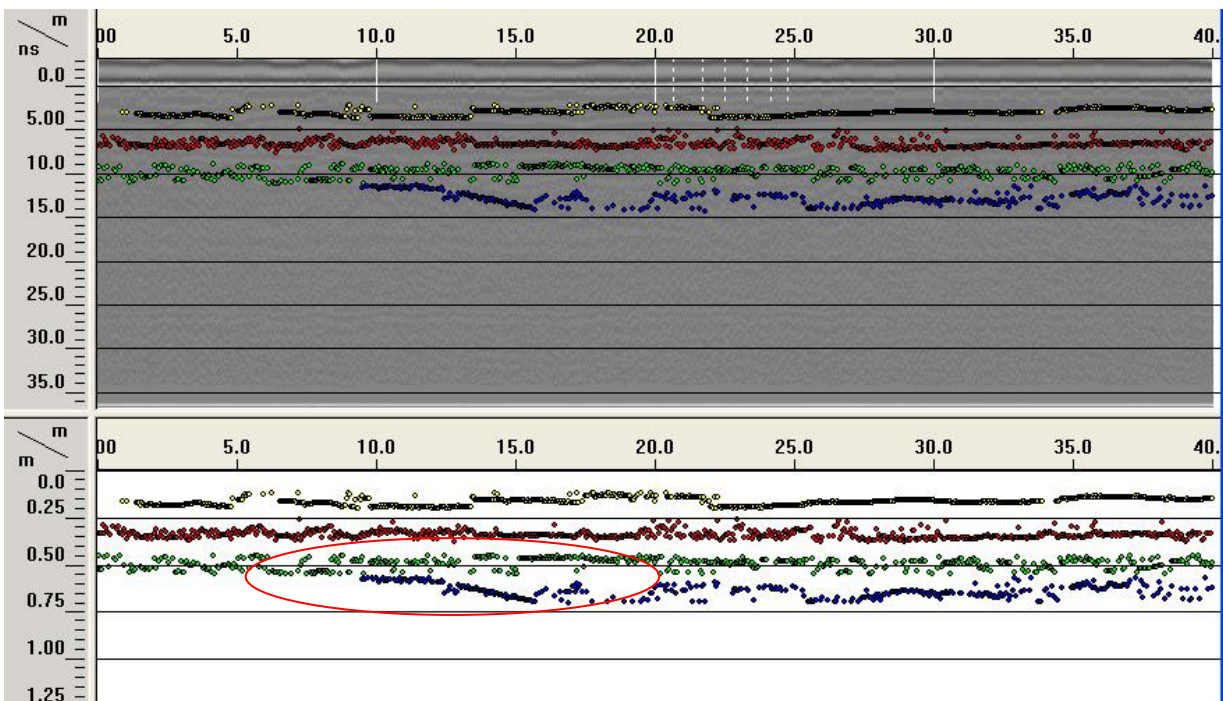


Fig.4.13 – Interpretação de resultados ao km 3+500; medições feitas com as antenas de 1 GHz e uma densidade de amostragem de 20 leituras por metro.

Entre o km 3+650 e o km 3+950 foi colocado um geotêxtil entre a camada de coroamento e a de enrocamento, aos 0,80 m de profundidade. A localização do geotêxtil, apesar de visível nos ficheiros obtidos com o georadar, não é detectável utilizando o *software* de processamento. Na Figura 4.14 apresenta-se o perfil obtido sobre um trecho localizado junto ao fim desta zona (km 3+950).

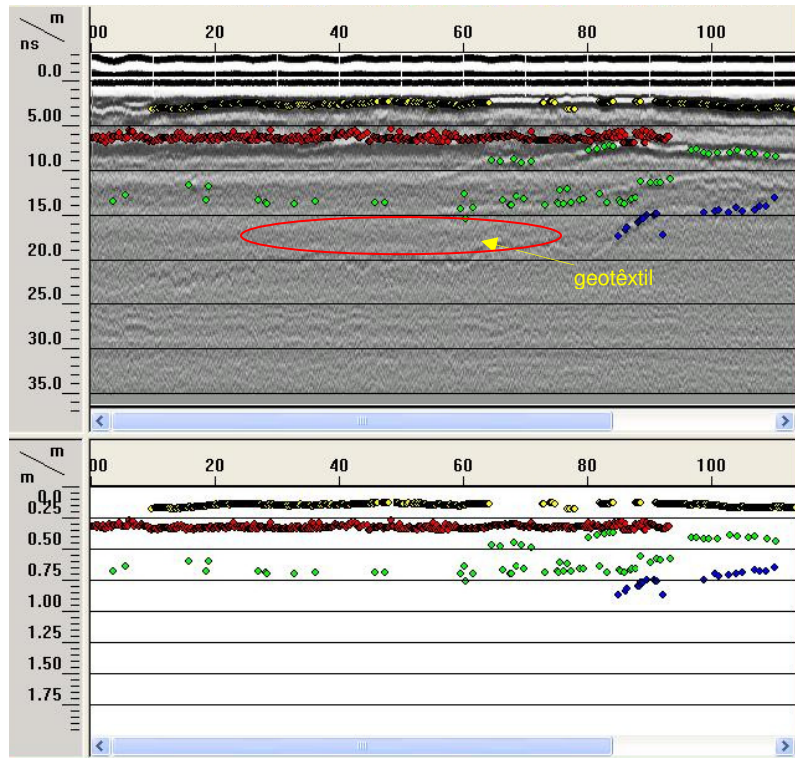


Fig.4.14 – Interpretação do perfil numa extensão de 50 m entre o km 3+650 e o km 3+950; medições feitas com as antenas de 1 GHz e uma densidade de amostragem de 20 leituras por metro.

Finalmente, perto do km 3+950 a espessura da camada de coroamento volta a ser de 0,35 m. Esta zona de transição é muito nítida em todos os perfis obtidos – Figura 4.15. Contudo, os melhores resultados foram obtidos utilizando uma maior densidade de amostragem; neste caso, 50 leituras por metro produziram imagens mais nítidas do que 20 leituras por metro.

À semelhança do que se verificou durante os ensaios laboratoriais, o par de antenas de 1 GHz conduziu a resultados muito satisfatórios, permitindo visualizar praticamente todas as variações na subestrutura em análise.

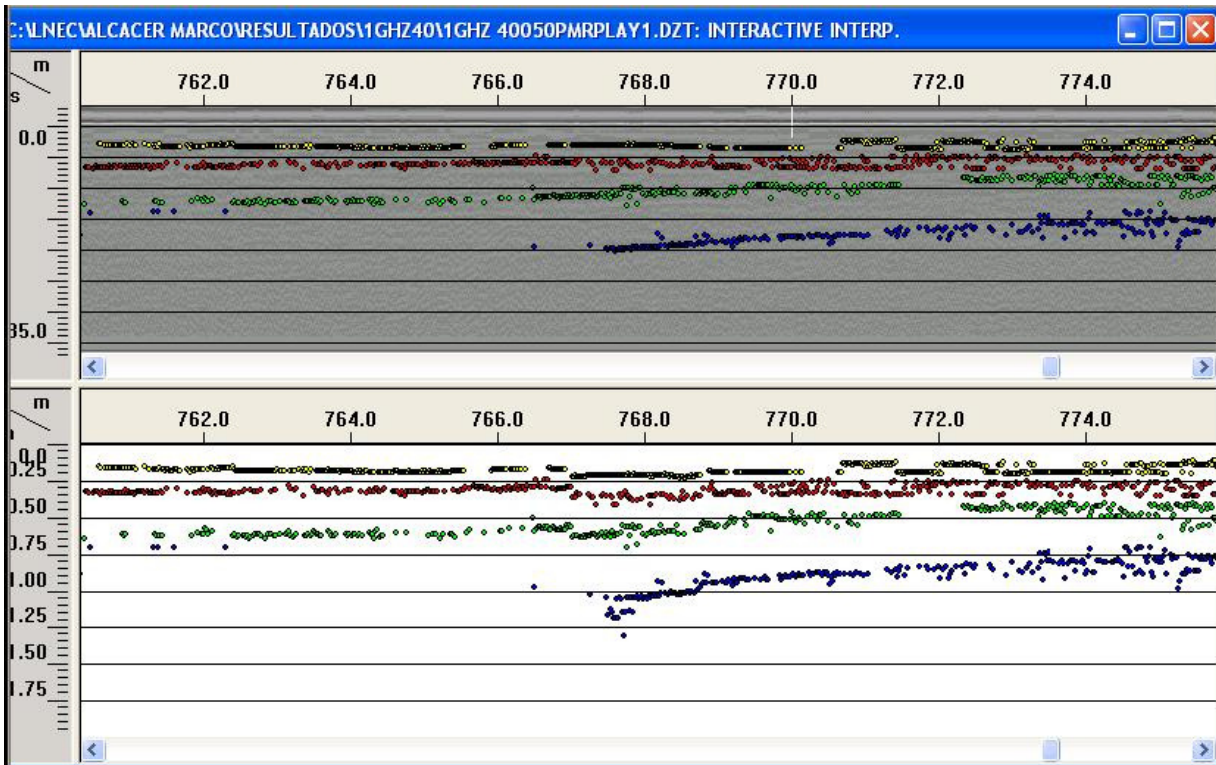


Fig.4.15 – Interpretação do perfil na zona de transição ao km 3+950; medições feitas com as antenas de 1 GHz e uma densidade de amostragem de 50 leituras por metro.

4.5.2. RESULTADOS OBTIDOS COM ANTENAS DE 2 GHz

Como foi referido por diversas vezes ao longo deste trabalho, antenas de maior frequência permitem análises mais pormenorizadas, mas também menos profundas. Recorrendo a antenas de 2 GHz, apenas se pode identificar as duas primeiras interfaces (entre as duas camadas de sub-balastro e entre o sub-balastro e a camada de coroamento). Assim sendo, utilizaram-se os dados recolhidos com as antenas de 2 GHz para avaliar a mudança no perfil que ocorre ao km 3+325.

A interpretação obtida para esta zona, ilustrada na Figura 4.16, não evidencia nitidamente a transição entre a zona que é construída com 30 cm de sub-balastro granítico e aquela que é construída com uma primeira camada de 15 cm de agregado calcário e uma subjacente de 15 cm de agregado granítico.

No entanto, analisando mais pormenorizadamente esta imagem, é possível constatar que na zona de 30 cm de agregado granítico a interface com o coroamento aparece nítida, enquanto que na zona que apresenta uma primeira camada de sub-balastro calcário, a delimitação mais nítida se encontra no topo desta camada (a 15 cm de profundidade), obtendo-se uma reflexão com mais ruído no topo do coroamento (a 30 cm de profundidade).

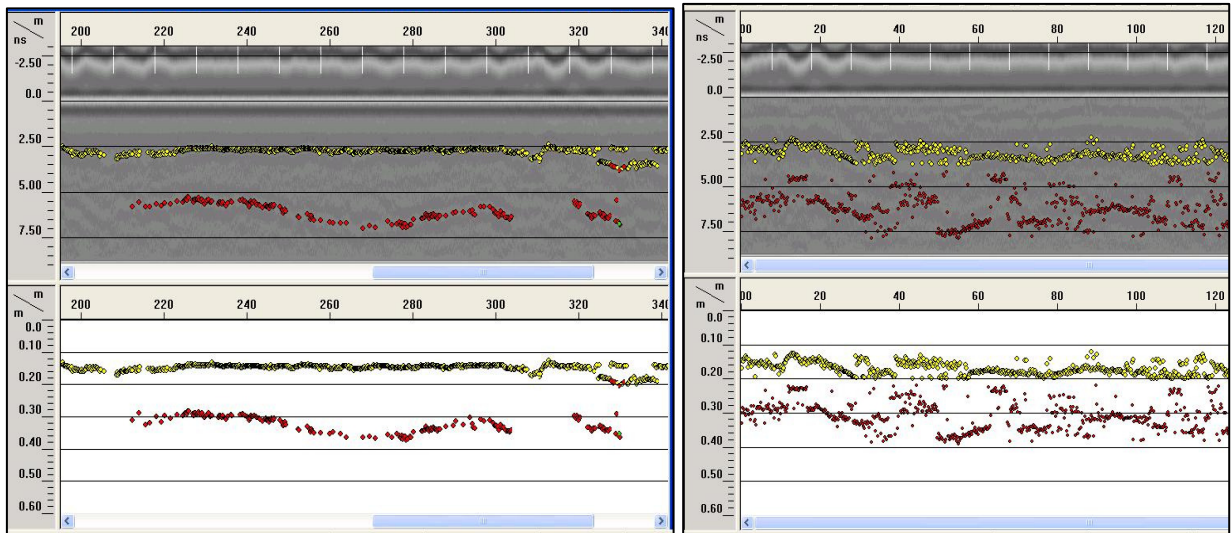


Fig.4.16 – Interpretação de resultados ao km 3+325 na zona com sub-balastro granítico (esquerda) e na zona com sub-balastro granítico e calcário (direita); medições feitas com as antenas de 2 GHz e uma densidade de amostragem de 5 leituras por metro.

5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. PRINCIPAIS CONCLUSÕES

Numa altura em que a globalização é, cada vez mais, o principal processo de desenvolvimento de uma sociedade, a qualidade das suas infra-estruturas de transporte é um factor determinante para a sua sustentabilidade. Actualmente, e após um longo período de negligência, o transporte ferroviário apresenta diversas potencialidades sobre as restantes alternativas, revestindo-se, assim, de uma grande importância na política de transportes nacional e internacional, principalmente ao nível do transporte de mercadorias.

Numa qualquer infra-estrutura de transporte, as recentes necessidades sociais traduzem-se num aumento do fluxo de tráfego, requerendo não só maior capacidade de carga da estrutura como também velocidades de tráfego superiores na via. Atendendo a que, muito frequentemente, se procuram satisfazer estas novas exigências através da modernização de vias existentes, a competitividade do transporte ferroviário está intrinsecamente associada à qualidade dos procedimentos de conservação e reabilitação.

Compreende-se, assim, que a optimização destes procedimentos se revista de enorme importância para as empresas responsáveis pela exploração das redes ferroviárias, não só pelo elevado peso orçamental que estes representam no custo total das ferrovias, como também pelo facto de condicionarem a normal utilização dos serviços. Por outro lado, o conhecimento das causas de degradação da estrutura poderá (e deverá) ser aproveitado para a concepção de novos projectos.

Neste âmbito, foi apresentado neste trabalho o Georadar, ou Radar de Penetração, uma técnica de ensaio não destrutiva com enorme potencial na avaliação de infra-estruturas de transporte. No seu âmbito, o georadar é um método de prospecção geofísica, baseado em princípios electromagnéticos. Existem actualmente diversas áreas técnicas onde o método tem sido aplicado com sucesso, revelando vantagens significativas sobre os métodos tradicionais. Nas infra-estruturas de transporte, o georadar tem vindo a ser utilizado para determinação da espessura e avaliação do estado (detecção de vazios, quantificação do grau de contaminação, etc.) das diversas camadas da subestrutura.

As infra-estruturas ferroviárias constituem, por diversas razões relacionadas com algumas das suas características físicas, um ambiente desfavorável para a aplicação do georadar. Por um lado, a presença de elementos metálicos (carris) para os quais o coeficiente de reflexão é próximo de 1, e de elementos em betão à superfície (travessas), limita a capacidade de penetração do sinal e a resolução das imagens, dificultando a interpretação dos resultados. Por outro, o tamanho das partículas que tipicamente compõem as camadas de balastro e sub-balastro, poderá originar fenómenos de difracção nestas, conduzindo a resultados com muito ruído.

Tipicamente, pela sua operacionalidade, são adoptadas antenas suspensas nos ensaios em ferrovias. Estas, além de permitirem velocidades de ensaio superiores, conduzem a imagens com maior resolução. As antenas com contacto na superfície são recomendadas apenas quando se pretende investigar camadas mais profundas da subestrutura (abaixo do balastro). Contudo, nos últimos anos, fruto do desenvolvimento exponencial das capacidades de processamento dos computadores, muitos técnicos têm recorrido aos dois tipos de antenas em simultâneo, obtendo resultados muito satisfatórios.

Nos últimos anos, diversas companhias de manufacturação de sistemas de georadar têm vindo a melhorar os seus equipamentos e programas de interpretação dedicados, providenciando novas soluções, adequadas à utilização em infra-estruturas ferroviárias. Assim, actualmente, esta técnica é utilizada nas ferrovias com os seguintes propósitos:

- Determinação das espessuras das camadas de apoio da subestrutura;
- Avaliação do estado dos materiais que as compõem;
- Identificação das causas de fenómenos de instabilidade;
- Identificação da posição do nível freático e de possíveis escoamentos sob a plataforma;
- Determinação do estado das travessas.

Ao longo da última década, o georadar provou ser um método preliminar de investigação muito viável, permitindo caracterizar, comparativamente, a totalidade do trecho em análise e possibilitando uma manutenção mais eficaz e económica da via. Saliente-se, contudo, que a viabilidade dos resultados obtidos por aplicação do georadar depende da correcta calibração do método. Para tal, a referenciação dos locais onde serão efectuados os furos de sondagem, ou qualquer outro método de calibração, deve ser o mais precisa possível, recomendando-se a utilização de um sistema de posicionamento (GPS) durante o ensaio com georadar.

Para além da realização de furos de sondagem, outro método de calibração recorrente em investigações em ferrovias é o de Antenas Múltiplas na Superfície. A utilização de diversas antenas durante o ensaio permite não só a determinação da velocidade de propagação das ondas, como também a conciliação das vantagens dos dois tipos de antenas (suspensas e com contacto na superfície) e a preparação de modelos tridimensionais (obtendo-se perfis longitudinais e transversais simultaneamente).

Nos ensaios realizados tanto na Linha do Sul como no trecho experimental e apresentados neste trabalho, recorreu-se a um procedimento de calibração distinto (através de uma placa metálica), fruto da inexistência da superestrutura da via. Este facto permitiu admitir que a altura das antenas, em relação à superfície, não se alterava significativamente, pelo que se pôde recorrer a uma técnica de calibração mais simples.

Durante a análise dos resultados relativos a estes ensaios foi possível avaliar a influência de alguns factores na qualidade da interpretação realizada, nomeadamente:

- A janela de visualização – esta funciona como um “corte” que é aplicado ao perfil, ditando a profundidade máxima observada;
- A densidade de amostragem – esta deverá ser baixa, evitando ficheiros de grande dimensão, mas adequada aos objectivos do estudo;
- A frequência de operação das antenas – as antenas de 1 GHz conduziram a resultados muito satisfatórios na quase totalidade da subestrutura; não obstante, em algumas zonas, apenas as antenas de 2 GHz permitiram visualizar as singularidades procuradas;
- O tipo de processamento adoptado – o processamento e interpretação dos dados devem ser feitos manualmente, dependendo em grande parte da experiência do técnico.

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

No que se refere às propriedades dieléctricas, devem prosseguir-se os estudos no sentido de estabelecer valores para os materiais mais comuns nas ferrovias portuguesas e possíveis variações para estes. Em particular, seria interessante promover a criação de índices de estado nas ferrovias analisadas, para uso em posteriores trabalhos de reabilitação. Estes deveriam considerar aspectos como o grau e tipo de contaminação do balastro e a variação do teor em água ou do nível freático.

Ainda relativamente a este tópico, dever-se-á aprofundar a influência do processo de compactação das camadas na interpretação dos resultados. Concretamente, os resultados obtidos no decorrer deste trabalho sugerem que este factor poderá criar interfaces dieléctricas tão nítidas como as provocadas por variações no teor em água.

O Radar de Penetração é uma técnica com enorme potencial na aplicação a infra-estruturas ferroviárias, pelo que se deve continuar a estimular não só a formação de técnicos habilitados como também a utilização sistemática do método, quer na construção de novas ferrovias quer na reabilitação das existentes.

Em particular em Portugal, a aposta deveria passar igualmente pela aquisição de equipamento por parte das entidades envolvidas na concepção, construção e manutenção das infra-estruturas. Seria igualmente interessante que as próprias instituições de ensino operassem como divulgadoras e formadoras de técnicos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Sussmann, T. R. *Application of ground penetrating radar to railway track substructure maintenance management*. Dissertação de Doutoramento, University of Massachusetts, Amherst, USA, 1999.
- [2] Saarenketo, T. *Electrical properties of materials and subgrade soils and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys*. Dissertação de Doutoramento, University of Oulu, Finland, 2006.
- [3] Ulriksen, C. P. F. *Application of impulse radar to civil engineering*. Dissertação de Doutoramento, Lund University of Technology, Sweden, 1982.
- [4] TRB *Ground penetrating radar for evaluating subsurface conditions for transportation facilities*. NCHRP Synthesis 255, TRB, National Academy Press, Washington D.C., 1998.
- [5] Fortunato, E. M. C. *Renovação de plataformas ferroviárias. Estudos relativos à capacidade de carga*. Dissertação de Doutoramento, Universidade do Porto, Portugal, 2005.
- [6] Fontul, S. *Structural evaluation of flexible pavements using non-destructive tests*. Dissertação de Doutoramento, Universidade de Coimbra, 2004.
- [7] Saarenketo, T. *GPR Applications in Europe*. Proceedings of the Transportation Research Board 85th Annual Meeting, 22 de Janeiro de 2006, Washington D.C., E.U.A.
- [8] <http://www.malags.com/Solutions/> 28 de Abril de 2009.
- [9] <http://www.g-p-r.com/satellit.htm> 28 de Abril de 2009.
- [10] The Finnish Geotechnical Society *Ground penetrating radar: geophysical research methods*, The Finnish Building Center Ltd., Helsinki, Finland, 1992.
- [11] Vogt, D. *A borehole radar system for South African gold and platinum mines*. South African Journal of Geology, Dezembro 2006, volume 109, páginas 521-528, Geological Society of South Africa, Johannesburg, South Africa.
- [12] Liu, S., Sato, M., Takahashi, K. *Application of borehole radar for subsurface physical measurement*. Journal of Geophysics and Engineering, 20 de Agosto de 2004, volume 1, páginas 221-227, Nanjing Institute of Geophysical Prospecting and Institute of Physics Publishing, Nanjing, China.
- [13] Manacorda, G. *IDS radar products for utilities mapping and ground classification*. Proceedings of 20th International No-Dig Conference and Exhibition, Maio de 2002, Copenhagen, Denmark.
- [14] Fontul, S., Antunes, M. L., Marcelino, J. *Structural evaluation of pavements using neural networks*. 2º Congresso Rodoviário Português “Estrada 2002”. CRP, Lisboa.
- [15] Geophysical Survey Systems, Inc. *BALLASTVUE module: RADAN software user’s guide*. Geophysical Survey Systems, Inc., Salem, New Hampshire, USA, 2008.
- [16] Brough, M. J., Ghataora, G. S., Stirling, A. B., Madelin, K. B., Rogers, C. D. F., Chapman, D. N. *Investigation of railway track subgrade. I: in-situ assessment*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Transport 156, Agosto de 2003, Issue TR3, páginas 145-154, Thomas Telford Journals, London, UK.
- [17] Jack, R., Jackson, P., *Imaging attributes of railway track formation and ballast using ground probing radar*. NDT & E Internacional, Dezembro de 1999, vol. 32, págs 457-462, Elsevier Science, Oxford, UK.

- [18] Hugenschmidt, J., *Railway track inspection using GPR*. Journal of Applied Geophysics, Março de 2000, vol. 43, págs 147 – 155, Elsevier Science B.V., Amsterdam, Netherlands.
- [19] Olhoeft, G. R., Selig, E. T., *Ground penetrating radar evaluation of railway track substructure conditions*. 9th International conference on ground penetrating radar, 2002, USA, vol. 4758, págs 48-53, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Bellingham, Washington, USA.
- [20] Brough, M., Stirling, A., Ghataora, G., Madelin, K., *Evaluation of railway trackbed and formation: a case study*. NDT & E Internacional, Abril de 2003, vol. 36, págs 145-156, Elsevier Science, Oxford, UK.
- [21] Hyslip, J. P., Smith, S. S., Olhoeft, G. R., Selig, E. T., *Assessment of railway track substructure condition using ground penetrating radar*. Proceedings of the 2003 Annual Conference of AREMA, 5-7 de Outubro de 2003, Chicago, 20 págs.
- [22] Carpenter, D., Jackson, P. J., Jay, A., *Enhancement of the GPR method of railway trackbed investigation by the installation of radar detectable geosynthetics*. NDT & E Internacional, Março de 2004, vol. 37, págs 95-103, Elsevier Science, Oxford, UK.
- [23] Hugenschmidt, J., *NDT Inspection of Railway Tracks Embedded in Concrete*. The 8th International Conference “Maintenance & Renewal of Permanent Way; Power & Signalling; Structures & Earthworks”, 29th – 30th June 2005, University of Westminster, London, Engineering Technics Press, Edinburgh, UK.
- [24] Roberts, R., Rudy, J., Al-Qadi, I., Tutumluer, E., Boyle, J., *Railroad ballast fouling detection using ground penetrating radar – a new approach based on scattering from voids*. The 9th European Conference on Non-Destructive Methods, 25th-29th September 2006, Berlin.
- [25] Roberts, R., Al-Qadi, I., Tutumluer, E., Kathage, A. *Ballast fouling assessment using 2 GHz horn antennas – GPR and ground truth comparison from 238 km of track*. 9th International Railway Engineering Conference, Junho de 2007, London, UK.
- [26] – Loizos, A., Plati, C., *Accuracy of ground penetrating radar horn-antenna technique for sensing pavement subsurface*. IEEE Sensors Journal, vol. 7, nº 5, Maio de 2007, págs 842-850, IEEE Sensors Council, USA.
- [27] - <http://malags.com/getattachment/9957f036-4026-4345-98b3-8e42dc60852c/Mapping-Railway-Ballast.aspx> 15 de Maio de 2009.

ANEXO I

Tabela I.1 – Propriedades eléctricas e velocidade de propagação da onda para alguns materiais ([1] [3] [8] [9] [11]).

Material	Valor dieléctrico (ϵ_r)	Condutividade (σ - mS/m)	Velocidade de propagação (m/ns)
Aço	1	1×10^9	0,300
Água destilada	80-81	0,01	0,033
Água doce	80-81	0,1-30	0,033
Água salgada	80-81	4000	0,033
Ar	1	0	0,300
Areia saturada	20-30	0,1-10	0,060
Areia seca	3-6	0,0001-1	0,141
Argila	4-16	0,2-50	0,095
Argila arenosa	6-9	100	0,110
Asfalto	3-5	-	0,150
Basalto	8	10	0,106
Betão	4-10	-	0,113
Calcário	4-8	25	0,122
Cobre	1	$5,8 \times 10^{10}$	0,300
Gelo	3-4	1	0,150
Granito	4-7	1×10^{-5} -1	0,128
Madeira	2-3	-	0,190
Neve	1,4	0,001-0,01	0,254
Rocha	4-10	0,01-10	0,113
Sal gema seco	5-6	0,01-1	0,128
Silte	9-23	1-10	0,075
Solo congelado	3-8	0,1-10	0,128
Turfa	50-78	1-2	0,038
Xisto argiloso	7	1-100	0,113

Tabela I.2 – Efeito de alguns materiais na propagação das ondas para a frequência de 1 GHz.

Material	Atenuação (dB/m)	Comprimento de onda (λ - cm)	Profundidade de penetração (cm)
Aço	$1,64 \times 10^9$	30	0
Água destilada	0,0002	0,37	16
Água doce	0,002-0,61	0,37	0,3-5
Água salgada	81	0,37	0,03
Ar	0	30	-
Areia saturada	0,007-0,654	1,2	0,5-5
Areia seca	$3,63 \times 10^{-5}$ -0,36	6,67	1,6-159
Argila	0,033-8,18	3	0,2-3,5
Argila arenosa	22	4	0,16
Asfalto	-	7,5	-
Basalto	2	3,75	0,5
Betão	-	4,29	-
Calcário	6,8	5	0,3
Cobre	$9,48 \times 10^{10}$	30	0
Gelo	0,409	7,5	1,6
Granito	3×10^{-6} -0,3	5,45	1,6-504
Madeira	-	12	-
Neve	0,001-0,01	21,43	16-50
Rocha	0,002-2,34	4,29	0,5-16
Sal gema seco	0,003-0,3	5,45	1,6-16
Silte	0,102-1,02	1,88	0,5-1,6
Solo congelado	0,03-0,3	5,45	1,6-5
Turfa	0,025-0,05	0,47	1,1-1,6
Xisto argiloso	0,234-23,4	4,29	0,16-1,6

1) Interfaces

Tabela II.1 – Simbologia para distinção de interfaces entre camadas.

Grau de distinção	Símbolo
Interface óbvio	_____
Interface discernível	-----
Possível interface	- - - - -

2) Objectos no sub-solo

Tabela II.2 – Simbologia para distinção de objectos no sub-solo.

Objecto	Símbolo
Pedregulho	◆
Reflector não identificado	^

ANEXO III

Tabela III.1 – Principais modos de rotura da via associados a defeitos na sub-estrutura [16].

Tipo de problema	Principais causas	Fenómenos Associados
Perda de estabilidade local	Aplicação repetida de grandes cargas à fundação. Solos com partículas finas. Elevado teor em água.	
Deformações plásticas excessivas	Carregamento repetido. Solos soltos ou pouco resistentes.	Assentamentos diferenciais da subestrutura. Depressões no balastro.
Desgaste com “mud pumping”	Carregamento repetido do leito pelo balastro. Tensões elevadas no contacto. Solos ricos em argilas. Elevado teor em água na superfície da fundação.	Balastro lamacento. Sub-balastro inadequado. Drenagem defeituosa do balastro.
Liquefacção	Carregamento repetido. Siltes saturados e areias finas.	Grandes deslocamentos. Mais grave com ocorrência de vibração. Pode ocorrer no sub-balastro.
Perda de estabilidade global	Peso do comboio, via e subestrutura. Capacidade resistente do solo inadequada.	Ocorre em aterros consideráveis com inclinações grandes. Causado pelo aumento do teor em água.
Assentamentos por consolidação	Peso do aterro. Solos de granulometria fina, saturados.	Aumento das tensões no solo.
Acção do gelo	Gelo muito frequente. Solos susceptíveis ao gelo.	Ocorre na mudança de estação Inverno - Primavera. Superfície da via áspera.
Dilatação e contracção	Solos muito plásticos. Teor em água variável.	Superfície da via áspera.
Erosão dos taludes	Percolação da água à superfície ou na subestrutura. Vento.	Solo levado pela água ou vento.
Colapso do solo	Inundações em depósitos de solos soltos.	Assentamentos no terreno.

Tabela III.2 – Ensaios recomendados para ferrovias que requerem acesso intermitente ao local [16].

Dispositivo de ensaio	Aplicações possíveis	Desempenho verificado
CSWS (<i>Continuous surface wave system</i>)	Identificação de subestruturas fracas e potenciais locais de risco. Determinação, <i>in situ</i> , de perfis do módulo de rigidez sob a via, sem remover esta ou o balastro. Identificação de interfaces e de anomalias. Avaliação do desempenho, <i>in situ</i> .	Equipa composta por 2 elementos. 50 ensaios por hora. 2 horas de preparação do equipamento. Profundidade máxima de 30 m.
Inspecção visual periódica	Identificação de mau desempenho da subestrutura ou potenciais zonas de risco. Avaliação da qualidade dos componentes da via e possível relação com o desempenho da estrutura. Identificação de causas genéricas de deterioração da qualidade da via.	1 homem. 1,6 km/h, num máximo de 8 km num dia.
DP (<i>Dynamic penetrometer</i>)	Determinação pontual, <i>in situ</i> , da capacidade resistente das camadas da subestrutura sob a via, sem remover esta. Identificação de zonas pontuais de mau desempenho.	Equipa de 2 elementos. 3 a 10 ensaios por hora. Profundidade máxima de 1,5 m.
Georadar	Identificação em contínuo de locais com elevado teor em água. Identificação em contínuo de interfaces e anomalias na subestrutura. Identificação em contínuo da profundidade do balastro e zonas contaminadas.	Equipa de 2 elementos. 1,6 km de via por hora. Profundidade máxima de 2 m.
Profile probe	Identificação de zonas de elevado teor em água. Determinação <i>in situ</i> de perfis do teor em água em pontos discretos sob a via, sem a remover. Avaliação <i>in situ</i> do desempenho dos elementos de drenagem. Identificação da profundidade do balastro limpo e avaliação do grau de contaminação nos locais de ensaio.	1 único elemento. 30 ensaios por hora (assumindo que os tubos de acesso estão instalados). Profundidade máxima de 1 m.
Escavação de secções da via	Identificação de mau desempenho da subestrutura ou potenciais zonas de risco no local ensaiado. Identificação de interfaces e anomalias na subestrutura em pontos discretos. Identificação da profundidade do balastro e grau de contaminação. Acesso a dispositivos móveis de ensaio e amostragem para recolha de dados geotécnicos.	Equipa de 2 elementos. 1 ensaio por hora. Profundidade máxima de 1 m.

Tabela III.3 - Ensaios recomendados para ferrovias que requerem acesso mais demorado ao local [16].

Dispositivo de ensaio	Aplicações possíveis	Desempenho verificado
ABS (<i>Automatic ballast sampler</i>)	Identificação de potenciais problemas em pontos discretos. Identificação de interfaces e anomalias na subestrutura nestes locais. Identificação da profundidade do balastro e avaliação do grau de contaminação. Determinação, indirectamente, no local, da capacidade resistente da camada e do teor em água na subestrutura, sem remover a via.	Equipa de 2 elementos. 5 ensaios por hora. Profundidade máxima de 2 m.
CPT (<i>Cone penetration test</i>)	Identificação de interfaces, estratificação e anomalias na subestrutura em pontos discretos. Determinação, no local, da capacidade resistente das camadas sob a via, sem a remover. Correlações com a compressibilidade volumétrica e rigidez da via. Fornece variáveis de base para o dimensionamento de medidas de reabilitação.	Equipa de 2 elementos. 2 ensaios por hora. Profundidade média de 10 m, mas poderá atingir 40 m em condições favoráveis.
FWD (<i>Falling weight deflectometer</i>)	Determinação de rigidez das várias camadas (incluindo a via) nas zonas ensaiadas, sem remover a via. Identificação de anomalias na subestrutura nesta zona. Fornece variáveis de base para avaliação do estado da subestrutura, potencial de deterioração e medidas de melhoramento da estrutura.	Equipa de 2 elementos. 20 ensaios por hora. Investigações pouco profundas.

ANEXO IV

Tabela IV.1 – Fuso granulométrico e características do material a aplicar na camada de coroamento (elementos cedidos pela REFER).

	Propriedade	ABGE Coroamento
Granulometria	40,0 mm	100
	31,5 mm	75 – 100
	20,0 mm	56 – 86
	14,0 mm	48 – 78
	10,0 mm	41 – 71
	6,30 mm	32 – 58
	5,00 mm	28 – 54
	4,00 mm	26 – 51
	2,00 mm	22 – 45
	0,42 mm	12 – 30
	0,125 mm	5 – 15
	0,063 mm	1 – 8
	Percentagem de material retido no peneiro de 20 mm	≤ 30%
	Resistência à Fragmentação Los Angeles	LA ≤ 45%
	Índice de Plasticidade	NP
	Limite de Liquidez Inferior	NP
	Valor azul de metileno	≤ 4 g/kg
	Equivalente de areia	≥ 40%

Tabela IV.2 – Comparação dos valores obtidos em laboratório relativos aos ABGE provenientes das pedreiras Sobrissul e Mota-Engil (elementos cedidos pela REFER).

Propriedade		Mota-Engil	Sobrissul
Granulometria	31.5 mm	100	100
	20.0 mm	75,4	92,2
	16.0 mm	66,2	86,2
	8.0 mm	49,9	67,1
	4.0 mm	38,3	51,5
	2.0 mm	30,2	34,9
	0.5 mm	16,9	14,2
	0.25 mm	11,7	9,6
	0.063 mm	5,3	5,3
Coefficiente de uniformidade		67,5	30
Coefficiente de curvatura		1,5	1,9
Índice de achatamento		-	-
Índice de forma		-	-
Coefficiente de Friabilidade		-	20
Coefficiente de Degradabilidade		-	1
Coefficiente de Fragmentabilidade		-	1
Coefficiente de Los Angeles (LA)		22,1%	27,4%
Coefficiente de Micro-Deval (M_{DE})		7,9%	8,1%
LA + M_{DE}		30%	36%
Permeabilidade		1,1 ⁻⁵ cm/s	2,6 ⁻⁴ cm/s
Índice de Plasticidade		NP	NP
Limite de Liquidez		NP	NP
Valor de azul de metileno		0,2 g/kg	1,20 g/kg
Equivalente de areia		56%	70%