



Ana Margarida Constantino Marques

Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

Avaliação da contaminação do balastro ferroviário
Contribuições na aplicação do Radar de Prospeção

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Estruturas

Orientadora: Doutora Simona Fontul, Professora Auxiliar
Convidada, FCT-UNL

Coorientador: Doutor André Luís Marques Paixão,
Bolseiro de Pós-doutoramento, CONSTRUCT - FEUP /
LNEC

Júri:

Presidente: Professora Doutora Zuzana Dimitrovová

Arguente: Professor Doutor José N. Varandas

Vogal: Professora Doutora Simona Fontul

Avaliação da contaminação do balastro ferroviário

Contribuições na aplicação do Radar de Prospeção

Copyright © Ana Margarida Constantino Marques, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

A presente dissertação representa o culminar de mais uma etapa da minha vida a que me propus, não simbolizando apenas a concretização de mais um objetivo académico. Deste modo, quero agradecer a todas as pessoas que contribuíram, direta ou indiretamente, para a sua realização.

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), mais especificamente, no Departamento de Transportes, sob a orientação da Professora Doutora Simona Fontul e coorientação do Doutor André M. Paixão. Devo desde já um agradecimento especial a esta entidade por promover condições para a realização deste trabalho.

Em primeiro lugar, gostaria de expressar a minha profunda gratidão à minha orientadora, Professora Doutora Simona Fontul, por ter aceite este desafio e ter alinhado nesta aventura comigo. Um enorme obrigada por toda a partilha de conhecimentos, pelo tempo disponibilizado, pelo encorajamento e pela confiança demonstrada ao longo destes meses; brindados com boa disposição em todos os momentos.

Ao Doutor André Marques Paixão o meu muito obrigado pelos ensinamentos e pela disponibilidade para coorientar este trabalho. Sem a sua ajuda, dedicação, perfeccionismo e críticas assertivas no decorrer deste trabalho, o resultado final não seria certamente o mesmo.

Agradeço ainda ao Técnico Superior Rui Coelho, pela sua colaboração e ajuda prestada na identificação de alguns troços, e à Engenheira Vânia Marecos pela oportunidade de poder acompanhar os seus ensaios com o Radar de Prospeção.

Aproveito também para expressar o meu agradecimento a todos os professores do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia, por todo o conhecimento que me foram transmitindo e por contribuírem para ser uma melhor profissional.

Um especial agradecimento aos meus pais e à minha irmã, sem eles não teria sido possível ter chegado até aqui, pelo que ficarei eternamente grata pelo apoio, confiança e oportunidade.

À minha amiga Marta M., que esteve presente em muitas fases deste percurso académico, pela amizade, entrega e força transmitida. Não esquecendo, as minhas colegas Sofia e Cláudia também pelo companheirismo e conselhos sem fim. A todos os meus colegas e amigos que, de uma forma ou de outra, me ajudaram a ultrapassar os obstáculos que foram surgindo e que não foram aqui mencionados dirijo, ainda assim, um grande obrigado.

Ao Miguel, o meu profundo agradecimento pelo que sacrificou em prol deste trabalho e, sobretudo, pelo apoio incondicional e paciência sem limites.

Resumo

No âmbito de infraestruturas de transporte, as camadas de apoio têm um papel fundamental no seu desempenho, quer em termos dos aspetos estruturais quer relativos à degradação dos materiais que as compõem. Particularmente, no domínio das infraestruturas ferroviárias, o balastro é considerado a camada de apoio fulcral, cujo desempenho é afetado negativamente pela sua contaminação. Assim, o foco principal deste trabalho assenta na avaliação da contaminação do balastro ferroviário recorrendo a um sistema de radar, denominado usualmente por Radar de Prospecção ou Georadar (GPR).

Deste modo, no sentido de tornar mais eficiente a gestão de infraestruturas ferroviárias, torna-se essencial localizar, de uma forma precoce e mais expedita, zonas que precisem de ações de intervenção/reabilitação. Neste contexto, o radar de prospecção tem sido apontado como uma ferramenta com enorme potencial, tendo adquirido grande relevância nos últimos anos.

Primeiramente, neste trabalho, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre os mecanismos subjacentes ao processo de contaminação do balastro e descreveram-se os fundamentos da prospecção com o GPR (o seu princípio de funcionamento, as suas aplicações, vantagens e limitações).

No sentido de apurar a aplicabilidade do método na avaliação de características das vias-férreas, foram alvo de estudo amostras laboratoriais e medições realizadas *in situ*, em troços de duas ferrovias em funcionamento. Em ambos os casos foram avaliados os diferentes níveis de contaminação do balastro, recorrendo a um *software* especializado para essa abordagem (análise temporal); comparando-se, posteriormente, esses resultados com uma análise no domínio da frequência desenvolvida num programa de cálculo numérico.

A presente dissertação retrata assim as possibilidades de ensaio com o equipamento do radar de prospecção mediante a análise de uma onda eletromagnética, no espaço temporal e no espectro da frequência com o propósito de apurar o estado de degradação das camadas de apoio de uma via ferroviária. Referem-se ainda algumas recomendações na utilização deste método, acrescentando a necessidade de desenvolvimentos futuros, numa tentativa de reduzir o número de ensaios destrutivos ainda praticados atualmente.

Palavras-chave: Balastro Contaminado, Ensaios Não Destrutivos, Radar de Prospecção, Infraestruturas Ferroviárias.

Abstract

In the transport infrastructures context, the support layers have a fundamental role in the degradation of the track condition, both in structural aspects and in terms of fouling of the materials that comprise them. Particularly in the field of railway research, ballast is the key element, and its fouling leads to track deterioration. Thus, the main focus of this work is based on the evaluation of the ballast fouling using a radar system, usually referred to as Ground Penetrating Radar (GPR).

Thus, in order to make the management of railway infrastructure more efficient, it is essential to locate, in an early and more expeditious way, areas that need intervention/rehabilitation actions. In this context, Ground Penetrating Radar has been identified as a tool with enormous potential, having acquired great relevance in recent years.

First, a bibliographical review of the mechanisms underlying the ballast fouling process was carried, and the fundamentals of prospection with GPR (its operating principle, its applications, advantages and limitations) were described.

In order to determine the applicability of the method in the evaluation of railway characteristics, laboratory samples and measurements carried out in situ, on sections of two railways in operation were analysed. In both cases the different ballast fouling levels were evaluated, using specialized software for this approach (temporal analysis); and then comparing these results with results of a frequency analysis developed within this study in an automatic calculation program.

This dissertation presents the possibilities of testing with Ground Penetrating Radar equipment by analysing an electromagnetic wave, in the temporal and frequency domain for the purpose of investigate the level of degradation of a railway track. Some recommendations are also made regarding the use of this method, adding the need for future developments in an attempt to reduce the number of destructive tests still practiced nowadays.

Keywords: Ballast Fouling, Non Destructive Tests, Ground Penetrating Radar (GPR), Railway Infrastructures.

Conteúdo

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Fundamentação e Enquadramento do Tema	1
1.2 Motivações e Objetivos	3
1.3 Metodologia	4
1.4 Estrutura da Dissertação	4
2. COMPORTAMENTO DA VIA-FÉRREA BALASTRADA	7
2.1 Introdução.....	7
2.2 A contaminação da camada de balastro	10
2.3 Drenagem e a influência da retenção da água	15
2.4 Considerações finais	17
3. O RADAR DE PROSPEÇÃO.....	19
3.1 Evolução histórica	19
3.2 Aspectos gerais.....	21
3.3 Princípios fundamentais do método	22
3.4 Aplicações do Radar de Prospecção	28
3.5 Considerações finais	30
4. O RADAR DE PROSPEÇÃO NA VIA-FÉRREA	31
4.1 Veículo de Inspeção da Via.....	31
4.2 Sistema de antenas utilizado na via-férrea	34
4.3 Procedimentos de preparação do ensaio	36
4.4 Calibração das antenas.....	40
4.5 Vantagens e limitações	41
4.6 Interpretação de dados	43
4.7 Considerações finais	48
5. ANÁLISE DA CONDIÇÃO DO BALASTRO COM RECURSO A FERRAMENTAS DISPONÍVEIS.....	49
5.1 Enquadramento	49
5.2 Características das antenas utilizadas.....	50
5.3 Dados utilizados na análise.....	51
5.4 Metodologia adotada	56
5.5 Processamento do sinal e Interpretação dos resultados	59
5.6 Dificuldades sentidas na análise e cuidados a ter na interpretação	72
5.7 Considerações finais	74
6. ANÁLISE DO SINAL DO RADAR EM FREQUÊNCIA.....	75
6.1 Contextualização	75

6.2	Análise de Fourier	77
6.3	Equações matemáticas subjacentes.....	81
6.4	Metodologia adotada	82
6.5	Processamento e Interpretação dos resultados.....	83
6.6	Considerações finais	106
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS E LINHAS DE INVESTIGAÇÃO FUTURAS	107
7.1	Apreciação do trabalho desenvolvido	107
7.2	Linhas de investigação futuras.....	109
	Referências Bibliográficas	111
	Anexo I.....	115
	Anexo II.....	117

Índice de Figuras

Figura 1.1 Sequência dos temas estudados e das ações desenvolvidas	5
Figura 1.2 Estrutura da dissertação	6
Figura 2.1 Esquema estrutural da via balastrada, perfil longitudinal (a) e transversal (b), adaptado [9].....	8
Figura 2.2 Parâmetros que influenciam o comportamento de uma via-férrea balastrada, adaptado [43].....	9
Figura 2.3 Aspeto da estrutura da via em função do tipo de contaminação: (a) desgaste dos elementos da	11
Figura 2.4 Aspeto geral de uma via-férrea com contaminação (a) e uma secção típica da camada de balastro (b), adaptado [10] [2]	12
Figura 2.5 Diferentes fontes de transmissão de água para a estrutura de uma via balastrada [13]	15
Figura 2.6 Primeira fase de desenvolvimento de bolsas de balastro [14]	16
Figura 2.7 Fase seguinte de desenvolvimento da deterioração das bolsas de balastro e do material da fundação [14].....	16
Figura 2.8 Plataforma altamente degradada com diferente geometria na camada de balastro [14]	17
Figura 3.1 Princípio de funcionamento do GPR, adaptado [19]	21
Figura 3.2 Aquisição de dados no terreno (a) e perfil resultante (b) [18].....	22
Figura 3.3 Exemplos de reflexões causadas por interfaces comuns [3].....	27
Figura 4.1 Veículo de inspeção geométrica de via - EM 120 [4]	32
Figura 4.2 Equipamento radar de prospeção da I.P., SA [7]	32
Figura 4.3 Modelo de funcionamento do sistema do Radar de Prospeção [18]	33
Figura 4.4 Equipamento GPR com antenas suspensas [27]	33
Figura 4.5 Diferença do sinal entre antenas suspensas (a) e apoiadas (b), com respetiva polaridade, adaptado [40].....	35
Figura 4.6 Exemplo da seleção de diferentes janelas de amostragem, com 15ns (a) e com 25ns (b) [44]	38
Figura 4.7 Exemplo da aplicação de um ganho: ficheiro GPR de origem (em cima) e visualização após o ganho (em baixo) [30].....	40
Figura 4.8 Testes típicos de calibração das antenas: (a) Teste de placa metálica; (b) Teste de oscilação;.....	41
Figura 4.9 Exemplo de uma janela de visualização de um programa comercial [5].....	44
Figura 4.10 Séries de dados GPR, perfil resultante (a) e imagem obtida após seleção de uma escala em tons de cinzento (b) [40]	44
Figura 4.11 Diferentes posições do nível "zero" propostas por utilizadores do radar de prospeção [32].....	46

Figura 4.12 Exemplo de um radargrama de origem (em cima) e do mesmo registo após a aplicação do filtro do tipo "background removal" (em baixo), ambos para uma antena de 400 MHz [19].....	47
Figura 5.1 Exemplificação da posição das antenas: (a) transmissão direta (GSSI) e (b) transmissão invertida (IDS)	50
Figura 5.2 Identificação da superfície numa amostra com placa metálica	58
Figura 5.3 Exemplo de identificação das reflexões num ficheiro típico do sistema de antenas IDS	58
Figura 5.4 Resultados obtidos para as amostras com índice de contaminação 15 e respetivos teores em água.....	60
Figura 5.5 Resultados obtidos, para as amostras laboratoriais, do índice de GBFI.....	61
Figura 5.6 Resultados obtidos para a secção A, em 2012 (a) e em 2015 (b)	62
Figura 5.7 Resultados obtidos para a secção B, em 2012 (a) e em 2015 (b)	63
Figura 5.8 Resultados obtidos para a secção C, em 2012 (a) e em 2015 (b)	64
Figura 5.9 Resultados obtidos para a secção D, em 2012 (a) e em 2015 (b)	65
Figura 5.10 Resultados obtidos para a secção E, em 2012 (a) e em 2015 (b)	66
Figura 5.11 Resultados obtidos, para as amostras laboratoriais, do índice de GBFI.....	68
Figura 5.12 Resultados obtidos para a secção F.....	69
Figura 5.13 Resultados obtidos para a secção G	70
Figura 5.14 Resultados obtidos, para as amostras laboratoriais, da amplitude do sinal.....	71
Figura 5.15 Resultados obtidos, para as amostras laboratoriais, da amplitude do sinal.....	72
Figura 5.16 Análises obtidas considerando diferentes intervalos de tempo: 0-2ns, 2-4ns, 4-6ns e 0-6ns.....	73
Figura 6.1 Conceito subjacente à transformada de Fourier, adaptado [25]	75
Figura 6.2 Exemplo de um sinal registado no domínio do tempo (a) e no espectro da frequência (b)	76
Figura 6.3 Terminologia da DFT [34]	82
Figura 6.4 Tipos de travessas de betão: (a) travessa bibloco; (b) travessa monobloco [38]	83
Figura 6.5 Resultados obtidos para o índice de contaminação 6 e $w = 8\%$ com as antenas da IDS: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência	84
Figura 6.6 Resultados obtidos para o índice de contaminação 55 e $w = 10\%$ com as antenas da IDS: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência	84
Figura 6.7 Resultados obtidos para a secção A (2012), no domínio do tempo (a) e no domínio da frequência (b)	85
Figura 6.8 Resultados obtidos para a secção B (2012), no domínio do tempo (a) e no domínio da frequência (b)	85
Figura 6.9 Resultados obtidos para a secção C (2012), no domínio do tempo (a) e no domínio da frequência (b)	86
Figura 6.10 Resultados obtidos para a secção D (2012), no domínio do tempo (a) e no domínio da frequência (b)	86

Figura 6.11 Resultados obtidos para a secção A (2015), no domínio do tempo (a) e no domínio da frequência (b)	86
Figura 6.12 Resultados obtidos para a secção B (2015), no domínio do tempo (a) e no domínio da frequência (b)	87
Figura 6.13 Resultados obtidos para a secção C (2015), no domínio do tempo (a) e no domínio da frequência (b)	87
Figura 6.14 Resultados obtidos para a secção D (2015), no domínio do tempo (a) e no domínio da frequência (b)	87
Figura 6.15 Resultados obtidos para a secção E (2012), no domínio do tempo (a) e no domínio da frequência (b)	88
Figura 6.16 Resultados obtidos para a secção E (2015), no domínio do tempo (a) e no domínio da frequência (b)	88
Figura 6.17 Resultados obtidos para o índice de contaminação 6 e $w = 8\%$ com as antenas da GSSI: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência	89
Figura 6.18 Resultados obtidos para o índice de contaminação 55 e $w = 10\%$ com as antenas da GSSI: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência	89
Figura 6.19 Exemplificação da leitura de amplitudes no domínio do tempo, com as antenas da IDS (a) e com as antenas da GSSI (b)	90
Figura 6.20 Resultados obtidos, para as amostras laboratoriais, da amplitude do sinal.....	91
Figura 6.21 Resultados obtidos, para as amostras laboratoriais, da amplitude do sinal.....	91
Figura 6.22 Resultados obtidos, para a Secção D, da amplitude do sinal no domínio do tempo	92
Figura 6.23 Resultados obtidos, para a Secção D, do tempo de propagação da onda	92
Figura 6.24 Parâmetros tidos em consideração na Fase I	93
Figura 6.25 Resultados obtidos no domínio da frequência, para a Secção D, das amplitudes 1, 2 e 7.....	94
Figura 6.26 Resultados obtidos no domínio da frequência, para a Secção D, das amplitudes 3, 4, 5 e 6.....	94
Figura 6.27 Resultados obtidos para a frequência das amplitudes 1, 2 e 7	95
Figura 6.28 Resultados obtidos para a frequência das amplitudes 3, 4, 5 e 6.....	95
Figura 6.29 Variação de amplitudes em função de P_k	96
Figura 6.30 Parâmetros que foram alvo de estudo na Fase II.....	96
Figura 6.31 Definição de novas secções, E1, E2, E3 e E4, respetivamente.....	98
Figura 6.32 Definição de novas secções, D1 e D2, respetivamente	98
Figura 6.33 Resultados obtidos para as secções E1, E2, E3 e E4 da 5ª amplitude ao longo de 1000 m.....	99
Figura 6.34 Resultados obtidos para as secções E1, E2, E3 e E4 da 7ª amplitude ao longo de 1000 m.....	99
Figura 6.35 Resultados obtidos para as secções D1 e D2 da 5ª amplitude ao longo de 1000 m	100

Figura 6.36 Resultados obtidos para as secções D1 e D2 da 7ª amplitude ao longo de 1000 m	100
Figura 6.37 Resultados obtidos para as secções E1, E2, E3 e E4 da variação da 1ª amplitude com a 2ª amplitude ao longo de 1000 m.....	101
Figura 6.38 Resultados obtidos para as secções D1 e D2 da variação da 1ª amplitude com a 2ª amplitude ao longo de 1000 m.....	101
Figura 6.39 Resultados obtidos para as secções E1, E2, E3 e E4 do declive ao longo de 1000 m	102
Figura 6.40 Resultados obtidos para as secções D1 e D2 do declive ao longo de 1000 m	103
Figura 6.41 Resultados obtidos para $\Delta 1^{\text{a}}$ amp.- 2^{a} amp. e para a 5ª amplitude ao longo dos primeiros 5 km.....	104
Figura 6.42 Resultados obtidos para $\Delta 1^{\text{a}}$ amp.- 2^{a} amp. e para a 5ª amplitude ao longo dos últimos 5 km.....	104
Figura 6.43 Resultados obtidos para a 7ª amplitude e para o declive ao longo dos primeiros 5 km	105
Figura 6.44 Resultados obtidos para a 7ª amplitude e para o declive ao longo dos últimos 5 km	105

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 Categorias de contaminação do balastro baseadas nos diferentes índices - adaptado [12].....	14
Tabela 3.1 Variação da constante dielétrica em função do tipo de balastro considerando antenas com diferentes frequências [5] [2]	24
Tabela 4.1 Características típicas das antenas de radar – adaptado [5] [18]	34
Tabela 5.1 Diferentes valores das constantes dielétricas obtidos para cada índice de contaminação e correspondente teor em água, considerando a antena de 400 MHz suspensa [16].....	51
Tabela 5.2 Algumas características da infraestrutura analisada com a antena de 400 MHz.....	53
Tabela 5.3 Diferentes valores das constantes dielétricas obtidos para cada índice de contaminação e correspondente teor em água, considerando a antena de 1 GHz [33]	54
Tabela 5.4 Dados relativos à infraestrutura analisada com a antena de 1 GHz	55
Tabela 5.5 Parâmetros considerados previamente à realização do ensaio	56
Tabela 5.6 Janelas de visualização adotadas em cada caso de estudo	57
Tabela 6.1 Categorias definidas por Fourier em função do tipo de sinal	77
Tabela 6.2 Ilustração das quatro transformadas de Fourier [34]	78

Simbologia

Abreviaturas

END	Ensaio Não Destrutivo
FI	<i>Fouling Index</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
GBFI	<i>GPR Ballast Fouling Index</i>
GPR	<i>Ground Penetrating Radar</i>
GSSI	<i>Geophysical Survey Systems Inc.</i>
IDS	<i>Ingegneria Dei Sistemi</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
IP	Infraestruturas de Portugal, S.A.
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Pk	Ponto quilométrico
R _{b-f}	<i>Relative ballast fouling ratio</i>
VIV	Veículo de Inspeção da Via

Símbolos

R	Coeficiente de penetração
k	Coeficiente de reflexão
σ	Condutividade elétrica (S/m)
ϵ_r	Constante dielétrica
ϵ_0	Constante dielétrica do vácuo
f	Frequência
ω	Frequência angular
T	Intervalo de tempo de amostragem
N	Número de pontos da amostra
s	Profundidade da interface (m)
ρ	Resistividade elétrica (Ωm)
t	Tempo de propagação da onda (ns)
w	Teor em água (%)
i	Unidade imaginária
c	Velocidade da luz no vácuo
v	Velocidade de propagação da onda

Capítulo 1

1. INTRODUÇÃO

1.1 Fundamentação e Enquadramento do Tema

Os caminhos-de-ferro e o transporte ferroviário têm tido um papel fundamental ao longo dos anos, no que se refere ao transporte de passageiros e mercadorias, um pouco por todo o mundo. Desde cedo são conhecidas as suas aplicabilidades e as suas inúmeras vantagens, tornando-se um marco na evolução do transporte terrestre.

As primeiras locomotivas a vapor datam de meados do século XVIII, em Inglaterra, como consequência da Revolução Industrial que ocorrera nessa época. Devido à alta rentabilidade destas máquinas juntando ainda a elevada velocidade e capacidade de carga, rapidamente passou a ser o transporte preferencial de mercadorias e de passageiros [1]. As distâncias tornavam-se assim mais curtas, ajudando o desenvolvimento do comércio e acabando com o isolamento de certas regiões. Contudo, foi nos meados do século XX que sentiram uma grande redução da sua atividade, como resultado da concorrência do transporte rodoviário e aéreo [2].

Entre os meados dos anos sessenta e setenta ganharam um novo ânimo, pois surgiu uma importante evolução nos caminhos-de-ferro devido ao aumento das solicitações impostas à rede ferroviária europeia. Face à necessidade de fazer frente ao processo acelerado de degradação do estado da via e aos cada vez maiores custos de operação tornou-se necessário procurar soluções que atenuassem esse processo [2]. O intenso tráfego misto, pois a mesma infraestrutura é utilizada simultaneamente para o transporte de mercadores e de passageiros, fez com que o domínio da investigação ferroviária se tornasse num enorme desafio de engenharia, acrescido dessa necessidade de conservação e, muitas vezes, de renovação de infraestruturas existentes.

Após a II guerra mundial, a reconstrução das linhas de caminho-de-ferro, em particular na Europa, manteve as normas de construção antigas e a configuração de origem, recorrendo a

travessas de madeira e fazendo uso de carris de perfil semelhante ao existente até à data [2]. Neste contexto e com o crescente anseio por viajar cada vez mais rápido e em maior segurança, tornou-se necessário melhorar tanto o material circulante como os diversos componentes da via, tendo em vista a obter estruturas que exibam um elevado desempenho com o mínimo risco potencial.

Deste modo, existem diversos ensaios que são normalmente realizados quer durante a construção quer durante a vida útil da estrutura e são imprescindíveis na sua caracterização e monitorização do seu comportamento. No que diz respeito à superestrutura, é usual medir a geometria da via e proceder a inspeções periódicas, enquanto ao nível da subestrutura são realizados apenas em situações excecionais, ou seja, após se verificar a existência de anomalias [3]. Contudo, verifica-se uma preocupação crescente em proceder também ao acompanhamento regular da subestrutura, de forma a evitar trabalhos de manutenção de grande vulto e prever eventuais defeitos que possam pôr em causa a sua regular exploração.

Neste sentido, surgiu então a necessidade de criar técnicas que possibilitassem recolher o maior número de informação da estrutura sem danificar a mesma ou, pelo menos, com o menor impacto possível, assinalando assim o aparecimento dos Ensaios Não Destrutivos (END).

Como o nome sugere, são métodos não invasivos que têm a vantagem de serem realizados com a estrutura em utilização, acrescentando ainda o facto de, em algumas circunstâncias, permitirem que os defeitos sejam identificados numa fase inicial do seu desenvolvimento. Como exemplo deste tipo de ensaios salienta-se: o raio-x, os ultrassons, métodos eletromagnéticos, emissão acústica, infravermelhos, laser, ressonância magnética, métodos esclerométricos, ensaios de carga [3].

De facto, tradicionalmente, as deficiências ao nível da plataforma só são detetadas quando o problema se torna, de alguma forma, visível à superfície ou quando se constata a existência de defeitos de nivelamento num determinado troço de forma recorrente. Para combater a falta de informação sobre o estado da plataforma de via os gestores de infraestruturas ferroviárias, principalmente na Europa, começaram a utilizar um sistema designado por Radar de Prospecção ou GPR (*Ground Penetrating Radar*) [4]. De entre os métodos referenciados anteriormente, o radar de prospecção oferece a possibilidade de realizar o ensaio de forma rápida e contínua, fornecendo informações sobre as camadas da subestrutura.

Em Portugal, foi o Laboratório Nacional de Engenharia Civil o pioneiro na aquisição deste equipamento, pelo que até há bem pouco tempo os poucos ensaios realizados eram da sua inteira responsabilidade [3]. Apesar do GPR ser ainda pouco utilizado no que diz respeito à avaliação em contínuo de infraestruturas ferroviárias, esta técnica provou ser uma ferramenta bastante útil na caracterização da espessura das camadas de apoio e eventuais alterações na estrutura [5].

Contudo, tem-se verificado que os resultados obtidos através da análise clássica do sinal no domínio do tempo não têm sido satisfatórios, nem coerentes, quando utilizados na avaliação da condição do balastro, nomeadamente no que diz respeito à sua contaminação.

Estudos recentes apontam para a potencialidade da aplicação desta ferramenta na deteção da condição do material quando analisada a variabilidade do sinal no domínio da frequência. No entanto, esta abordagem carece de estudos mais aprofundados, para validar a sua aplicação em infraestruturas ferroviárias, na avaliação da condição do balastro.

Dos estudos efetuados resultam novos conhecimentos que poderão ser aplicados nas intervenções de renovação de infraestruturas ferroviárias, atualmente a decorrer em Portugal e noutros países. Deste modo, os temas abordados na presente dissertação são, na visão do autor, de uma importante contribuição no âmbito da investigação ferroviária, contendo informação útil que poderá ser essencial a aplicar nos trabalhos de recuperação ou remodelação das linhas de caminhos-de-ferro. Atendendo ainda que diagnosticar a necessidade de intervenção, ou até a profundidade dessa intervenção, continua a ser um enorme desafio, os processos de conservação têm um papel determinante na qualidade de qualquer estrutura.

1.2 Motivações e Objetivos

A realização do presente trabalho é uma mais-valia no âmbito da investigação de infraestruturas de transporte, com principal relevo para as ferrovias, possibilitando um conhecimento mais aprofundado no que diz respeito à contaminação do balastro com recurso ao equipamento do Radar de Prospeção.

Diversos estudos têm sido desenvolvidos nesta vertente com o intuito de averiguar quais os fatores que condicionam a vida útil do balastro, contribuindo para a sua degradação e pondo assim em causa o seu normal funcionamento. Contudo, conforme já foi referido, a avaliação da condição deste material requer de estudos mais aprofundados.

Este trabalho tem então como objetivo contribuir para a melhoria do uso de técnicas não destrutivas na caracterização das camadas de apoio, mais concretamente, na deteção do nível de contaminação do balastro ferroviário na presença de partículas finas. Um estudo importante no sentido de selecionar de uma forma precoce e mais expedita zonas que precisam de intervenção/reabilitação. Pretende-se assim contribuir para a identificação de zonas críticas e, se possível, prever defeitos futuros, de uma forma mais eficiente relativamente ao que tem vindo a ser feito.

1.3 Metodologia

A metodologia considerada ao longo do desenvolvimento deste trabalho apresenta-se sucintamente na Figura 1.1, ilustrando a sequência dos assuntos estudados e a diversidade e interdependência das ações desenvolvidas.

De modo a cumprir os objetivos procedeu-se a uma recolha bibliográfica extensa, de forma a obter um conhecimento aprofundado dos meios e abordagens aplicados atualmente.

No decorrer do trabalho, serão apresentados e analisados dois casos de estudo com o propósito de aprofundar os conhecimentos relativos à técnica do GPR. A metodologia proposta consiste em estabelecer relações entre os resultados obtidos pela abordagem clássica, no domínio do tempo, e os resultados obtidos no domínio da frequência; com vista a obter informações que permitam apoiar as decisões de intervenção de manutenção, ao nível da rede ferroviária.

Uma vez que se pretende melhorar a interpretação dos ensaios não destrutivos nas infraestruturas ferroviárias, melhorando assim a deteção e avaliação das camadas de apoio, serão analisadas medições realizadas em diferentes épocas, nomeadamente, antes e após manutenção, e em diferentes troços da via.

1.4 Estrutura da Dissertação

O presente documento encontra-se organizado em 7 capítulos, incluindo esta *Introdução* presente no capítulo 1 que procura contextualizar o uso do radar de prospecção em infraestruturas ferroviárias e apresentar a metodologia e os principais objetivos do trabalho. De modo a facilitar a leitura do documento, encontra-se esquematizada na Figura 1.2 a forma como foi organizada esta dissertação e, assim, consegue-se ter uma visão geral do desenvolvimento do trabalho.

No segundo capítulo – *Comportamento da Via-férrea Balastrada* – descrevem-se os principais parâmetros utilizados para a avaliação da contaminação do balastro contaminado assim como a identificação dos fatores que contribuem para a sua degradação. Salientam-se ainda as principais formas de transmissão de água na via-férrea e os fatores que advêm de uma má drenagem e que contribuem para a aceleração do processo de degradação.

No terceiro capítulo – *O Radar de Prospecção* – apresenta-se primeiramente uma breve introdução histórica do radar e de seguida descreve-se o seu princípio de funcionamento, referindo as propriedades eletromagnéticas dos materiais, as equações inerentes e o modo de propagação da onda no meio; *a posteriori* refere-se ainda a diversidade de aplicações deste método.

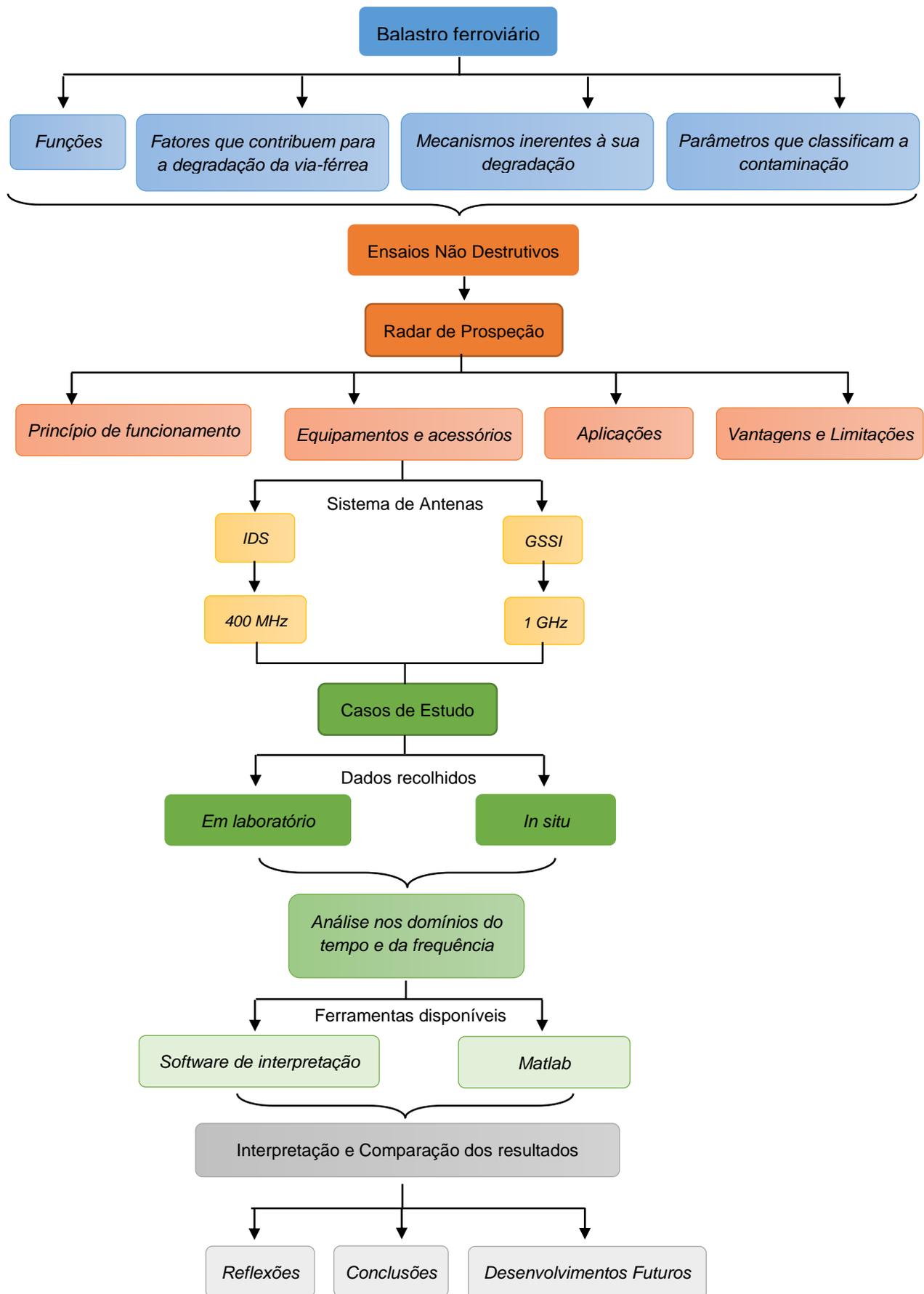


Figura 1.1 Sequência dos temas estudados e das ações desenvolvidas

No quarto capítulo – *O Radar de Prospecção na Via-férrea* – faz-se uma descrição dos equipamentos e acessórios utilizados para a avaliação da via-férrea, dado que a aplicação do radar neste caso tem desafios e cuidados específicos, abordando de seguida os procedimentos de preparação e condução aquando do ensaio. Por fim, referem-se as vantagens e limitações do método e salientam-se os procedimentos a ter em conta ao recorrer-se a um programa de interpretação de dados.

O quinto capítulo – *Análise da condição do balastro com recurso a ferramentas disponíveis* – é dedicado à análise e ao tratamento de dados com o recurso a um programa comercial de interpretação, aplicando o radar de prospecção aos casos de estudo de vias-férreas balastradas. Pretende-se averiguar o grau de contaminação e a alteração do nível de teor em água presente naquelas vias.

No sexto capítulo – *Desenvolvimento e Aplicação de metodologia alternativa* – apresenta-se o estudo feito com uma nova abordagem que tem como base a análise da variabilidade do conteúdo em frequência do sinal, comparando-se posteriormente com a análise feita no capítulo anterior.

Por último, no sétimo capítulo – *Considerações finais e Linhas de investigação futuras* – salientam-se as principais conclusões obtidas no decorrer deste trabalho, assim como se identificam algumas sugestões para possíveis desenvolvimentos futuros

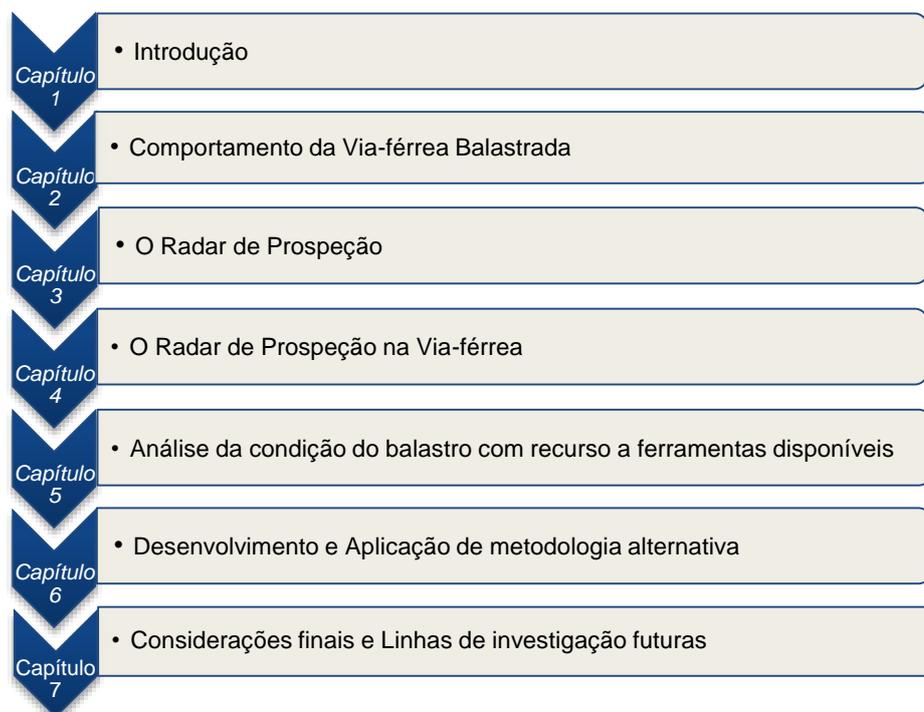


Figura 1.2 Estrutura da dissertação

Capítulo 2

2. COMPORTAMENTO DA VIA-FÉRREA BALASTRADA

2.1 Introdução

A via-férrea balastrada consiste numa estrutura plana composta por carris e travessas (unidos por elementos de fixação) que se encontram apoiados numa camada de balastro. Esta camada, por sua vez, assenta sobre uma camada de sub-balastro que forma a camada de transição para a fundação.

De facto, desde o seu início que a estrutura de uma via balastrada não obteve uma mudança substancial nos seus componentes. Contudo, foram efetuados vários desenvolvimentos após a II guerra mundial, dos quais se destacam: a introdução do carril soldado; o uso de travessas de betão; perfis ferroviários mais pesados; elementos de fixação inovadores; mecanização da manutenção; introdução de equipamentos de medição avançados e sistemas de gestão de manutenção [6]. Mais tarde, veio-se a verificar que este tipo de via com estrutura clássica, nomeadamente a via balastrada representa a melhor solução, devido ao seu baixo custo de construção e relativa facilidade de manutenção quando equiparada às soluções de vias não balastradas.

Apresenta-se de seguida um exemplo deste tipo de via (perfil transversal e longitudinal), representado na Figura 2.1, indicando simultaneamente os diferentes elementos que a constituem. De notar que, uma via balastrada se encontra dividida em duas grandes componentes: a superestrutura e a subestrutura. A superestrutura é constituída pelos carris, pelos elementos de ligação (fixações), pelas travessas e pela camada de balastro; enquanto a subestrutura é composta pelo sub-balastro, leito (coroamento) e pelo terreno de fundação.

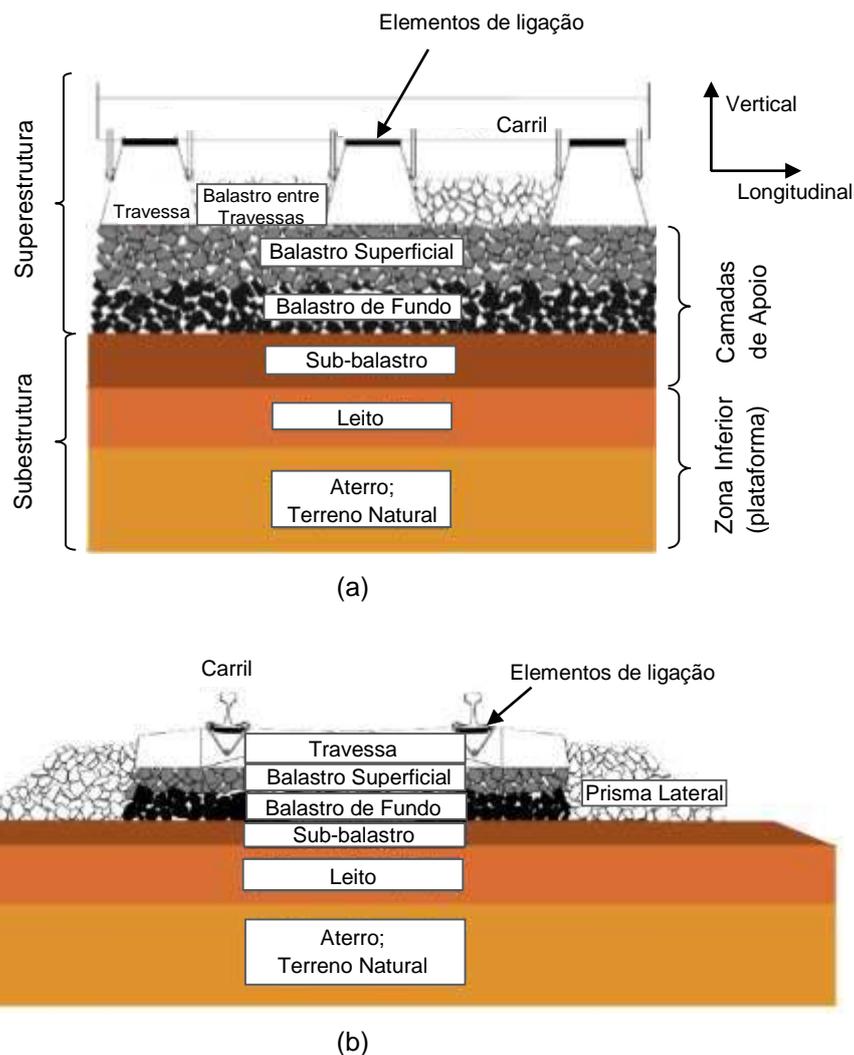


Figura 2.1 Esquema estrutural da via balastrada, perfil longitudinal (a) e transversal (b), adaptado [9]

Observando ainda o esquema estrutural apresentado, verifica-se que se distinguem quatro zonas de balastro: 1) balastro entre travessas; 2) prisma lateral; 3) balastro superficial, que constitui a subcamada superior que é afetada diretamente durante as ações mecânicas de conservação; 4) balastro de fundo, que constitui a subcamada inferior.

A camada de balastro, pertencendo à superestrutura da via, é então o elemento responsável por [7]:

- promover a distribuição homogênea das forças sobre a plataforma;
- oferecer uma alta resistência longitudinal e lateral para a armadura da via;
- garantir uma boa drenagem da água;
- garantir a elasticidade da via com a finalidade de amortecer as cargas dinâmicas;
- permitir uma fácil correção de eventuais erros da geometria da via.

Sabendo que uma via-férrea degrada rapidamente durante um certo período de tempo, ter o conhecimento do processo de degradação ajudará na estimativa do futuro estado das condições da via e na mitigação dos problemas associados à segurança. No sentido de clarificar os componentes que estão subjacentes a esse fenómeno, apresenta-se na Figura 2.2 o esquema dos elementos que influenciam o comportamento da via.

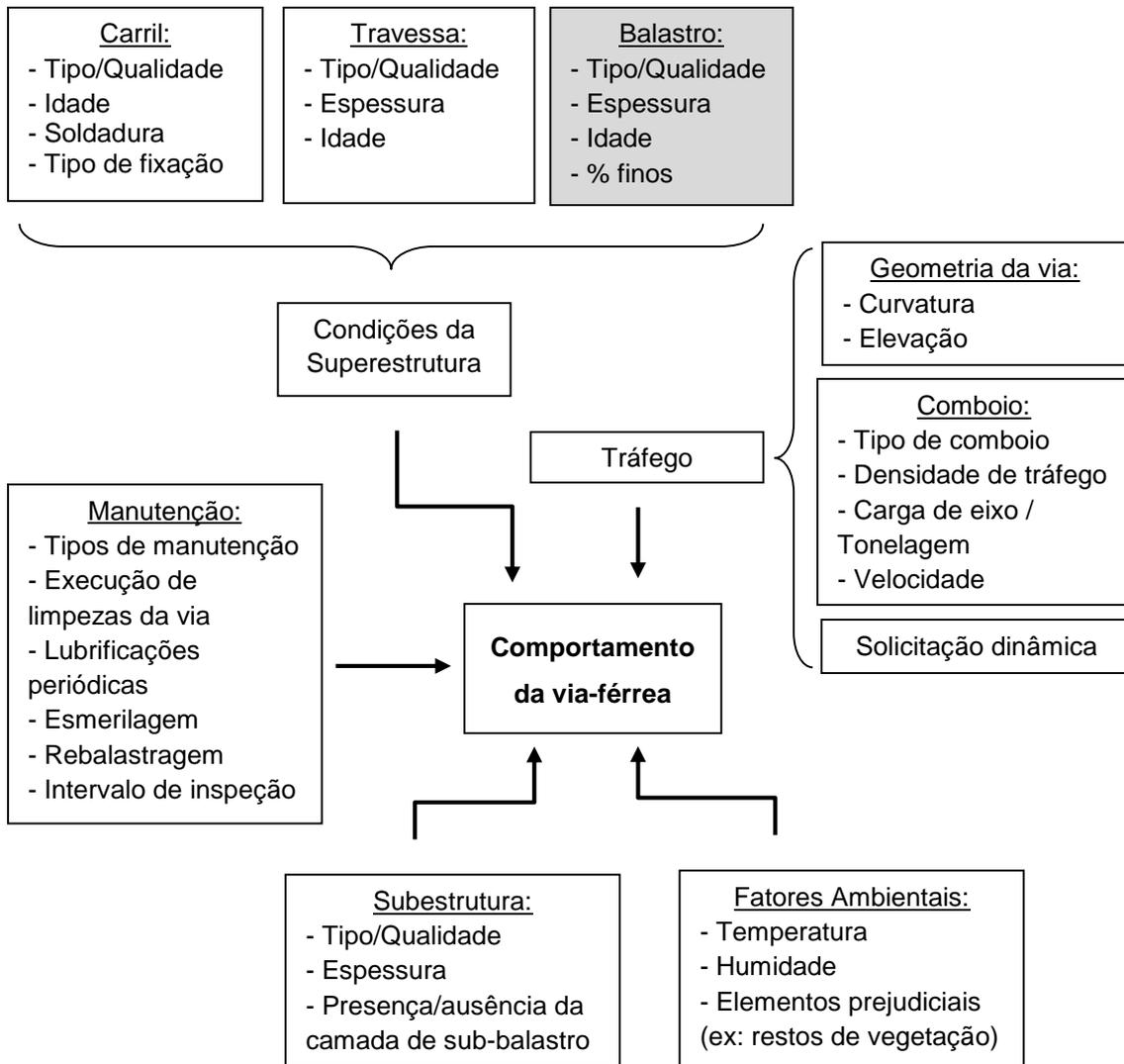


Figura 2.2 Parâmetros que influenciam o comportamento de uma via-férrea balastrada, adaptado [43]

É perceptível que a degradação do estado da via-férrea é um processo complexo que envolve a influência de diversos fatores que poderão condicionar o seu desempenho durante a vida útil da estrutura e conseqüentemente a durabilidade da própria via. Deve-se estar ciente de que para uma correta avaliação da via, é preciso ter em consideração a influência de todos esses fatores não só a sua evolução/degradação de forma isolada mas principalmente como um todo. Contudo, no âmbito deste trabalho, o foco principal assenta na avaliação da condição da camada de balastro, parte salientada na Figura 2.2.

2.2 A contaminação da camada de balastro

É de constatar que o balastro ferroviário é um elemento fulcral numa via balastrada, constituído normalmente por material britado com cerca de 30cm¹ de espessura. Embora usualmente este material seja considerado como um “material resiliente” [2], proporcionando um adequado comportamento da via, quando se verifica que os espaços vazios entre as suas partículas são preenchidos por água e/ou por material mais fino, esta resiliência tende a diminuir, assumindo-se deste modo que o balastro está contaminado.

O comportamento deste material depende, de entre outros fatores, das suas características intrínsecas, tais como [8]: a natureza, a forma e as propriedades físicas dos agregados (porosidade, dureza, resistência ao desgaste, alterabilidade, etc.); da granulometria adotada (em particular, da percentagem de finos); e da quantidade de elementos britados.

No que diz respeito à sua degradação, verifica-se que existem alguns fatores que contribuem para a contaminação do balastro, levando assim a deficientes condições de serviço. Selig e Waters propuseram então a divisão desses fatores em cinco categorias [9]:

- i. Esmagamento e desgaste das partículas de balastro
- ii. Infiltração de materiais a partir da superfície
- iii. Desgaste da travessa
- iv. Infiltração de materiais a partir das camadas granulares subjacentes
- v. Infiltração de materiais a partir da fundação

Segundo as suas publicações, a principal fonte de contaminação corresponde à colisão das partículas de balastro que advém da aplicação das cargas a que este fica sujeito, levando assim ao esmagamento progressivo e à decomposição das partículas granulares (Figura 2.3 (a)).

A contaminação proveniente dos materiais infiltrados a partir da superfície (sentido descendente), como é o caso do carvão, minério, areia, restos de vegetação, pode ter diversas origens, nomeadamente estes elementos prejudiciais podem ser depositados na via na altura da colocação do balastro, podem ter origem em materiais caídos dos veículos de transporte de mercadorias ou ainda podem ser provenientes das ações climáticas, no caso de geadas, amplitudes térmicas, humidade, etc [7] (Figura 2.3 (a)).

No que diz respeito à alteração do material das travessas, esta pode estar associada à presença de lamas provenientes quer do desgaste do material do balastro quer das camadas inferiores. A formação destas lamas está associada à utilização de rochas brandas (maior deformabilidade) nessas camadas, que pela ação das cargas dinâmicas, essencialmente na presença de água, podem ser bombadas para a superfície [2]. Estas lamas provocam erosão tanto no balastro envolvente das travessas, provocando vazios debaixo destas, como no betão das próprias

¹ Considera-se uma altura mínima de balastro sob as travessas de 25cm e máxima de 50cm [9]

travessas, o que pode conduzir a danos localizados. Outra causa que poderá estar na origem deste fenómeno corresponde ao movimento sofrido pelas travessas à passagem dos comboios, nas situações em que o balastro está mal compactado, principalmente devido ao atrito entre este material e as próprias travessas (Figura 2.3 (a)).

A contaminação devido à migração de finos das camadas subjacentes (sentido ascendente) pode dever-se a dois fatores: ou à ausência de camadas protetoras ou quando estas estão executadas deficientemente; o que se traduz numa granulometria inadequada ou numa má compactação das camadas [7] – ver Figura 2.3 (b). Muitas vezes, estas camadas são constituídas por balastro contaminado que não foi removido durante os trabalhos de reabilitação ou renovação, ou ainda por materiais que foram colocados com o objetivo de funcionarem como sub-balastro [9].

Por último, a infiltração de materiais a partir da fundação corresponde a um mecanismo de contaminação que se traduz também pela ascensão de partículas finas, as quais vão contaminar o balastro, tal como está representado na Figura 2.3 (c). Nos casos em que se verifica a ausência de uma camada de sub-balastro, poderá ser uma causa importante da contaminação dos materiais do balastro, resultante do desgaste por atrito da fundação com esta camada [2].

Na Figura 2.3 apresenta-se esquematicamente o aspeto da estrutura da via em função do tipo de contaminação.

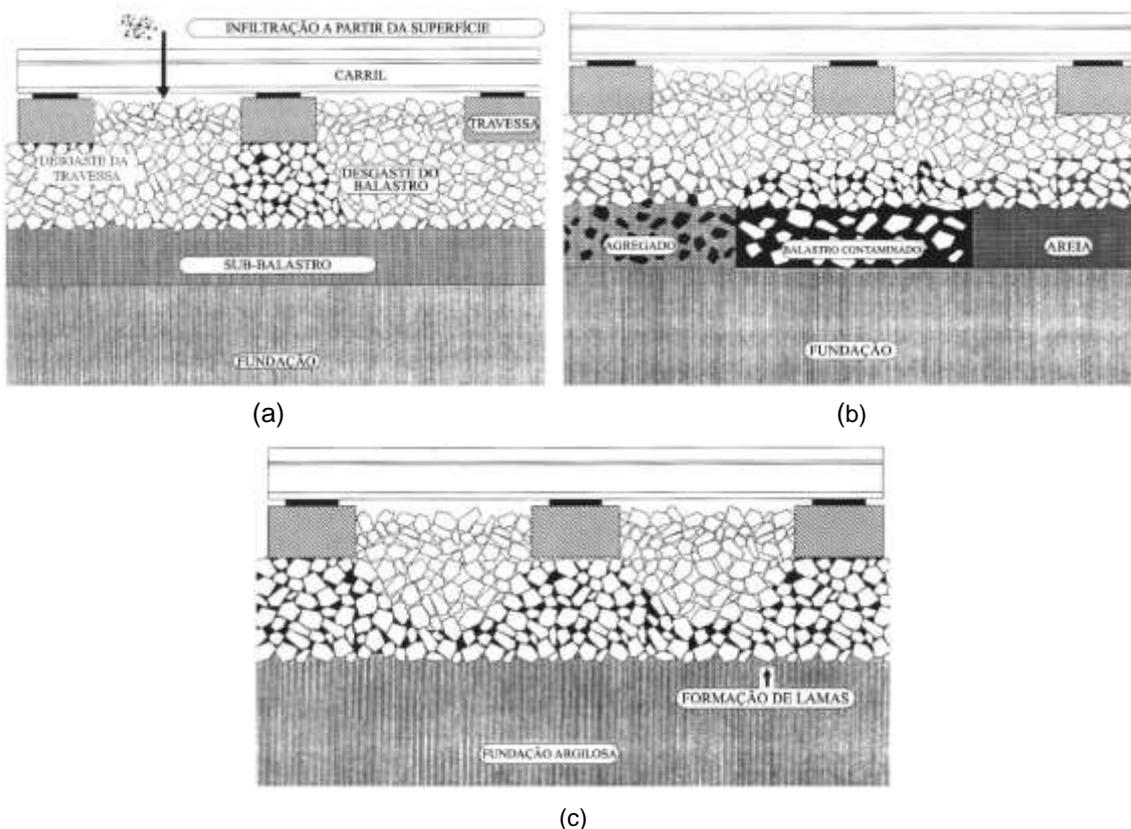


Figura 2.3 Aspeto da estrutura da via em função do tipo de contaminação: (a) desgaste dos elementos da via e infiltração de materiais a partir da superfície; (b) infiltração de materiais a partir das camadas granulares subjacentes ao balastro; (c) infiltração de materiais a partir da fundação [2]

Tendo como objetivo assegurar a resiliência do balastro, alguns especialistas consideram que este deve ser limpo, no mínimo, com uma periodicidade de doze a dezassete anos [2]. De facto, a própria contaminação presente no balastro acelera o seu processo de alteração, contribuindo para a redução da permeabilidade da camada e, conseqüentemente, o aumento da sua degradação. No entanto, assume-se que em princípio o material que constitui a camada de balastro é colocado na via no estado limpo ou praticamente limpo, não devendo apresentar mais do que 1% a 2% do seu peso de material contaminante [9].

É perceptível que os elementos que compõem a superestrutura são elementos de desgaste mais ou menos elevado, devido à passagem do tráfego. O sub-balastro e a plataforma têm, normalmente, uma duração mais elevada (da ordem de 50 a 100 anos), desde que sejam convenientemente realizados os trabalhos de conservação e reabilitação da superestrutura, da subestrutura e de drenagem.

Na Figura 2.4, apresenta-se esquematicamente uma secção típica da camada de balastro com diferentes graus de contaminação e ainda o aspeto geral de um troço experimental.



Figura 2.4 Aspeto geral de uma via-férrea com contaminação (a) e uma secção típica da camada de balastro (b), adaptado [10] [2]

De um modo geral, na origem destes fenómenos podem estar:

- a) Fatores relacionados com o tráfego, devido às solicitações impostas, a travessa tende a levantar e a assentar novamente na camada de balastro, o impacto causado devido aos esforços dinâmicos podem sobrecarregar o balastro e levá-lo à rotura, ao deslizamento e à abrasão das suas partículas;
- b) Fatores associados às características dos solos, nomeadamente, a alteração das características mecânicas dos diversos elementos;
- c) Fatores ambientais (teor em água e temperatura dos solos)

2.2.1 Índice de Contaminação (*FI*)

Atualmente, na literatura existem diversos índices para caracterizar a degradação do balastro. Selig e Waters (1994) foram os pioneiros desta designação e definiram “Fouling Index” como o parâmetro que considera o somatório da percentagem de material que passa no peneiro 4, com malha de dimensão 4,75mm, com a percentagem de material que passa no peneiro 200 com malha de 0,075mm.

Deste modo, o valor do índice de contaminação é dado pela seguinte expressão:

$$FI = P_4 + P_{200} \quad (1)$$

Este parâmetro classifica a contaminação do balastro com base na granulometria do material, ou seja, faz a distinção entre a componente granular do material contaminante (partículas finas²) e a componente fina desse material (finos) [2]. É de notar que os finos são contabilizados duas vezes neste índice, devido à sua importância na diminuição da capacidade de drenagem, ou seja, quanto maior o número de finos, maior o FI, e conseqüentemente maior é o volume de vazios do balastro que será ocupado por este material [5].

Contudo, isto poderá levar a uma má interpretação relativamente à quantidade real de material contaminado, uma vez que este parâmetro não tem em conta a densidade do material de contaminação [11], não detetando assim a presença de vários materiais, os quais podem apresentar características diferentes.

2.2.2 Percentagem de Vazios com Contaminação (*PVC*)

Mais tarde, Feldman e Nissen (2002) definiram a percentagem de contaminação nos vazios (*Percentage Void Contamination*) como a relação entre o volume do material contaminado (V_2), correspondendo às partículas que passam no peneiro 9.5mm, e o volume inicial de vazios entre as partículas de balastro antes da contaminação (V_1). O valor de PVC é então dado pela seguinte expressão:

$$PVC = \frac{V_2}{V_1} \times 100\% \quad (2)$$

² A Norma Europeia (EN13450) define partículas finas e finos como sendo aqueles que têm dimensão inferior a 0,5mm e 0,063mm, respetivamente.

Importa salientar que o volume considerado é calculado depois do material contaminado ter sido compactado, ou seja, este índice não tem em conta os vazios entre as partículas de contaminação, o que nem sempre representa com precisão o volume real degradado numa via ferroviária [11].

2.2.3 Índice Relativo da Contaminação do Balastro (R_{b-f})

Posto isto, surge então um novo parâmetro que relaciona o volume de partículas que passa no peneiro 9,5mm, traduzindo o material de contaminação, com as partículas de balastro que ficam retidas nesse mesmo peneiro. Este parâmetro é dado pela seguinte fórmula:

$$R_{b-f} = \frac{M_f \left(\frac{G_{s-b}}{G_{s-f}} \right)}{M_b} \times 100\% \quad (3)$$

Em que:

M_f – Massa seca do material contaminante (massa dos finos);

M_b – Massa seca do balastro;

G_{s-b} – Massa volúmica (densidade) do balastro;

G_{s-f} – Massa volúmica (densidade) do material contaminante (finos).

Assim, encontram-se representados na Tabela 2.1 os níveis de contaminação num dado balastro, de acordo com os diferentes parâmetros mencionados anteriormente.

Tabela 2.1 Categorias de contaminação do balastro baseadas nos diferentes índices - adaptado [12]

<i>Categoria de balastro</i>	<i>FI (%)</i>	<i>PVC (%)</i>	<i>R_{b-f} (%)</i>
<i>Limpo</i>	<1	<2	<2
<i>Moderadamente limpo</i>	1 a <10	2 a <9.5	2 a <10
<i>Moderadamente contaminado</i>	10 a <20	9.5 a <17.5	10 a <20
<i>Contaminado</i>	20 a <40	17.5 a <34	20 a <50
<i>Muito contaminado</i>	≥ 40	≥ 34	≥ 50

2.3 Drenagem e a influência da retenção da água

Um fator a ter em conta no comportamento de uma via-férrea balastrada é a sua capacidade de drenagem. A drenagem da via caracteriza-se então por facilitar a entrada de água a partir: i) do topo da estrutura (precipitação); ii) escoamento superficial e iii) infiltração subterrânea. Um esquema dessas diferentes formas de transmissão de água encontra-se representado na Figura 2.5.

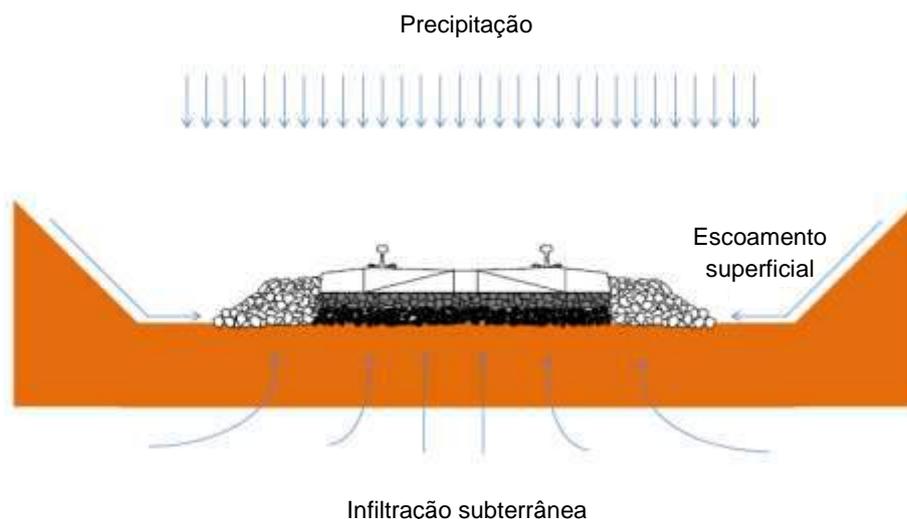


Figura 2.5 Diferentes fontes de transmissão de água para a estrutura de uma via balastrada [13]

Como já referido, a estrutura de uma via-férrea deteriora-se com o excesso de acumulação de água na subestrutura, proveniente da diminuição da resistência do solo com o aumento do teor em água. Destacam-se de seguida alguns fatores que podem estar associados ao “enfraquecimento” da estrutura provenientes da retenção da água [13] [9].

- Aumento das pressões nos espaços vazios, proveniente das ações dinâmicas, que provocam deformações plásticas e, conseqüentemente, uma diminuição da rigidez e resistência do solo;
- Atrito entre a fundação e a camada de balastro/sub-balastro;
- Formação de lamas;
- Bombeamento dos finos;
- Alterações do volume das camadas;
- Degradação química do balastro proveniente de chuvas ácidas;
- Ações de gelo/degelo;
- Inclinação lateral inadequada de forma a direcionar corretamente a água.

Embora algumas partes da camada de balastro possam estar secas, geralmente, o balastro, o sub-balastro e a plataforma contêm sempre algum teor em água. De facto, sabe-se que tanto a plataforma como a camada de sub-balastro apresentam um melhor desempenho (sob cargas

repetidas) quando apresentam um teor em água intermédio (entre o estado seco e o estado saturado) [9].

Claramente, uma drenagem eficiente pode prevenir ou minimizar estes problemas que têm uma grande influência nos custos de manutenção de uma via-férrea. Como cada fonte de água requer diferentes métodos de drenagem, é necessário reconhecê-las em cada caso para determinar soluções adequadas.

É ainda importante referir que as deformações plásticas que ocorrem no subsolo, proveniente das cargas repetidas a que fica sujeito, levam à formação de “bolsas de balastro” [14]. Este fenómeno verifica-se quando surgem depressões na parte superior da plataforma ou por baixo da camada de balastro de fundo (ou sub-balastro) (ver Figura 2.6).

Ao se desenvolverem estas depressões, a água começará a ficar retida naquelas zonas e ao acumular-se nas bolsas de balastro fará com que a plataforma se vá deformando ainda mais.

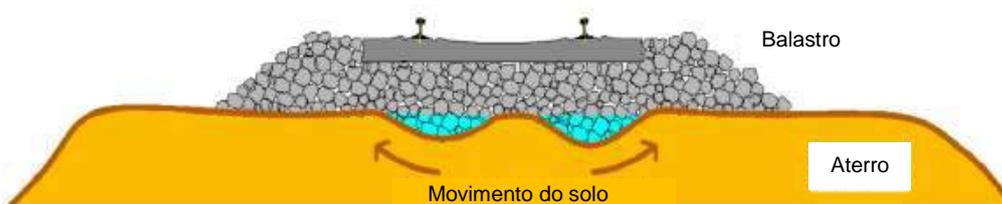


Figura 2.6 Primeira fase de desenvolvimento de bolsas de balastro [14]

Com a retenção da água, os materiais da camada de balastro tendem a misturarem-se com os da fundação, levando assim à contaminação do balastro em causa, expandindo-o mais para o interior da fundação. Este fenómeno encontra-se esquematizado na Figura 2.7.

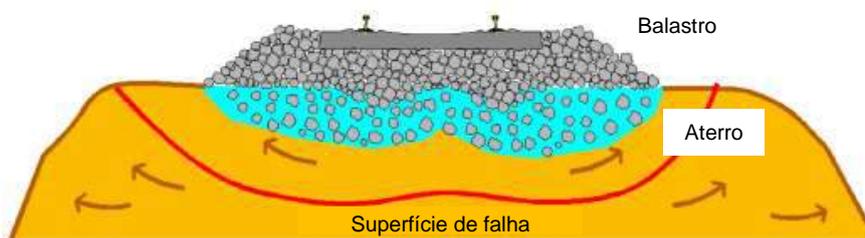


Figura 2.7 Fase seguinte de desenvolvimento da deterioração das bolsas de balastro e do material da fundação [14]

Ao formar-se esta superfície de falha (a partir das bolsas de balastro), poderá contribuir para mudanças indesejáveis da geometria da via, devido aos assentamentos diferenciais sentidos naquela zona (ver Figura 2.8).

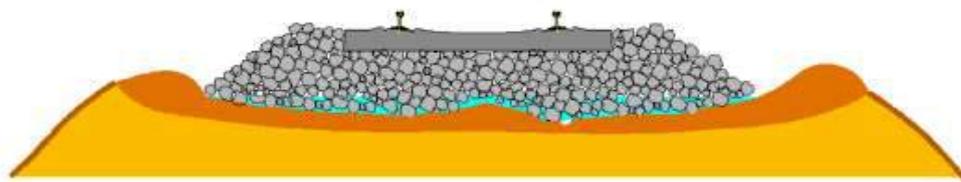


Figura 2.8 Plataforma altamente degradada com diferente geometria na camada de balastro [14]

De notar que além do seu efeito prejudicial sobre o material circulante, restabelecer a qualidade da via após todos estes fenómenos é uma tarefa bastante complexa, envolvendo a remoção de todo o material afetado assim como é necessário restaurar a camada de formação (plataforma).

Caso as bolsas de balastro sejam detetadas precocemente, é possível impedir que se desenvolvem mais através de medidas de drenagem eficientes que consigam direcionar a água aí acumulada. O conhecimento preciso da localização, assim como da profundidade, dessas bolsas permitirá que a intervenção seja mais eficaz, evitando operações de limpeza e renovação em larga escala [14].

Assim, é essencial o conhecimento detalhado da distribuição da água pois ajudará a fornecer informações importantes sobre as causas e possíveis soluções para a falha de drenagem que poderão promover a contaminação do balastro.

2.4 Considerações finais

Como se viu anteriormente, a degradação do estado da via é um processo complexo que envolve a influência de diversos fatores que poderão condicionar o seu desempenho durante a vida útil da estrutura e conseqüentemente a durabilidade da própria via. Cada vez mais, os esforços de investigação ferroviária são realizados não apenas com o intuito de resolver os problemas de degradação, como também no sentido de determinar a contribuição de cada parâmetro em todo o processo.

Assim, uma inspeção regular da via-férrea é imprescindível para garantir não só as condições de conforto e segurança inerentes como também contribuiu para ações de manutenção mais eficientes e precisas.

No âmbito deste trabalho a principal preocupação incide em avaliar a condição do balastro ferroviário. Assim, definiu-se “balastro contaminado” como sendo o material resultante da evolução do balastro e da sua mistura com partículas de menores dimensões, provenientes, em muitas situações, dos solos que constituem as camadas subjacentes.

Nesse sentido, diversas publicações têm sido feitas no sentido de apurar as principais causas do aumento da degradação desta camada, concluindo-se que o manuseamento e o aumento do número de ciclos de carga e descarga induzidos pela passagem dos comboios têm um peso considerável.

Foram ainda referidos, neste capítulo, os principais parâmetros atualmente aplicados para classificar o nível de contaminação das partículas do balastro. Contudo, pretende-se ressaltar que não existem metodologias que permitam fazer a caracterização do balastro de forma adequada, em parte devido às características da própria camada.

Por fim, salientaram-se as principais fontes de transmissão de água numa via-férrea assim como os principais fatores que advêm de uma má drenagem e que contribuem para a aceleração do processo de degradação.

Capítulo 3

3. O RADAR DE PROSPECÇÃO

3.1 Evolução histórica

A palavra “Radar” nasce da denominação em inglês “*RAdio Detecting And Ranging*” que descreve o equipamento utilizado para detetar objetos e as suas correspondentes posições, através da transmissão de ondas eletromagnéticas numa determinada gama de frequências.

A primeira aplicação deste método de prospecção geofísica ocorreu na Áustria em 1929, quando W. Stern mediu a profundidade de um glaciário [2]. Apesar de esta tecnologia ter sido utilizada pela força aérea norte-americana, durante os anos 50, para determinar a distância dos aviões ao gelo de modo a evitar que estes se despenhassem [3]; é no final dos anos 60 que começou a recorrer-se a este método de forma mais sistemática, nomeadamente para projetos militares como, por exemplo, na deteção de minas e de túneis durante a guerra do Vietname.

Na década de 70 foi registada a primeira patente comercial do radar de prospecção, após ter sido criada a primeira companhia de manufatura deste equipamento, a GSSI (*Geophysical Survey Systems Inc.*), e desde então começaram a ser publicados diversos trabalhos sobre as suas aplicações [3]. De facto, foram sendo desenvolvidos testes para estudar as obras de arte e as infraestruturas de transporte, no sentido de analisar a viabilidade da sua utilização, primeiramente em túneis e mais tarde em pontes.

Embora o domínio da sua aplicação seja maioritariamente em infraestruturas rodoviárias, o primeiro registo do radar de prospecção (ou georadar) em infraestruturas ferroviárias remonta ao início dos anos 80. Foi também nessa altura que, na Dinamarca e também na Suécia, foram registados os primeiros ensaios realizados com o acoplamento de antenas em contacto com a superfície (antenas de contacto), designado na literatura da especialidade por “ground coupled antennas” [15]. No entanto, o método naquela época não teve uma grande aceitação por parte da comunidade científica, mesmo após os resultados até terem sido promissores.

Foi em 1988, na Finlândia, que surgiu um especial interesse por esta técnica, começando por ser utilizada como uma ferramenta de rotina em projetos de concepção e reabilitação de estradas. Grande parte dos trabalhos de investigação e desenvolvimento em aplicações rodoviárias foram realizados com o recurso a antenas de contacto com baixas frequências, entre 100 MHz e 500MHz [15]. O objetivo era então fazer o levantamento das diferentes camadas e descontinuidades do solo.

Nos meados dos anos 90, começaram a ser realizados testes com antenas com maiores frequências, na ordem de 1,0 GHz e 1,5 GHz, recorrendo aos dois tipos de antenas: suspensas e de contacto, maioritariamente realizados em pontes, na medição das camadas de pavimentos e para o controlo de qualidade [15]. Os primeiros ensaios efetuados nos Estados Unidos com este método datam nos meados dos anos 70, no entanto só quinze anos mais tarde é que foi desenvolvido o primeiro sistema GPR acoplado em veículos, também para a avaliação de infraestruturas rodoviárias.

Foi no final dos anos 80 e início dos anos 90 que se verificou a sua aplicação no que diz respeito a medições da espessura dos pavimentos, detetando os espaços vazios sob lajes de betão como também zonas deterioradas em tabuleiros de pontes [16]. Das várias aplicações registadas, o radar de prospecção mostrou ser mais bem-sucedido na medição da espessura das camadas, enquanto na deteção de vazios mostrou ter resultados menos satisfatórios [15].

De resto, não apenas no contexto rodoviário mas também no domínio de infraestruturas ferroviárias, é na Europa que o recurso ao GPR é mais frequente, sendo que nos EUA são ainda poucas as referências a casos de aplicação existentes.

De facto, a utilização desta ferramenta na Europa foi ganhando cada vez mais força, aumentando num curto espaço de tempo o seu número de utilizadores. Na Finlândia, os primeiros testes levados a cabo em 1986 fez com que o método rapidamente se tornasse uma ferramenta indispensável [16]. No âmbito das ferrovias, a preocupação de uma eficiente gestão, devido à crescente tendência de tráfego misto e às condicionantes meteorológicas presentes na região, manter a linha em boas condições mostrou ser um enorme desafio. Deste modo, o sistema GPR tornou-se a tecnologia de inspeção de infraestruturas que possui o sistema mais rápido e com melhor qualidade de dados [17], além de ser um método não destrutivo que permite uma informação contínua das condições da via, faz jus às exigências económicas.

3.2 Aspetos gerais

O Radar de Prospecção é um método de auscultação que utiliza uma fonte de onda rádio para transmitir um impulso de energia eletromagnética na estrutura inspecionada, sem interferir com o meio em análise. Ao transmitir-se esse impulso de energia a partir da superfície, este propaga-se verticalmente no subsolo até intersectar uma descontinuidade elétrica (condutividade elétrica, permeabilidade magnética e constante dielétrica), aí é parcialmente refletido e transmitido no meio que está sendo investigado – “cada meio tem a sua própria assinatura” [4].

Como exemplo encontra-se representado na Figura 3.1 o funcionamento deste radar. Trata-se assim de um sistema de geração, emissão e recepção de ondas eletromagnéticas, numa determinada gama de frequência (10 MHz – 2,5 GHz) de curta duração.

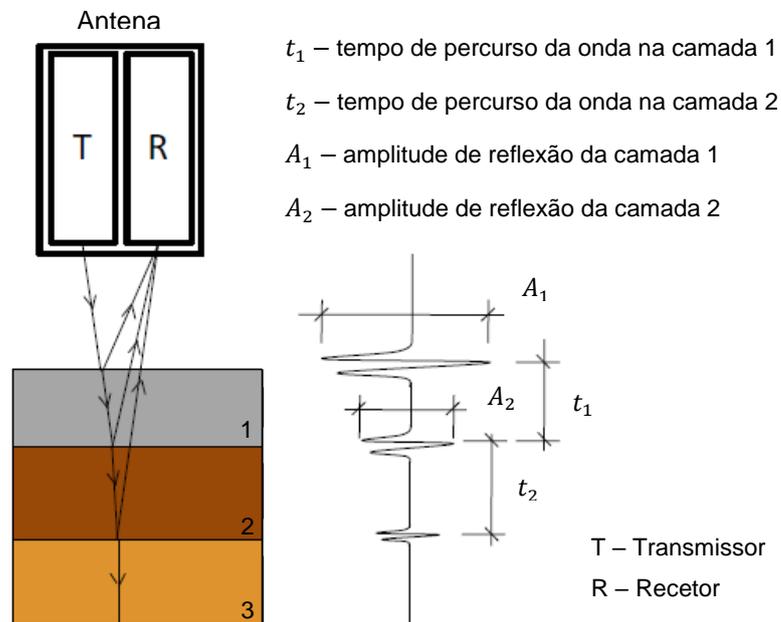


Figura 3.1 Princípio de funcionamento do GPR, adaptado [19]

A percentagem de onda refletida 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.

Deste modo, é possível determinar, por exemplo, a profundidade de um objeto enterrado no subsolo, bastando para isso conhecer o tempo de percurso da energia refletida, geralmente designado por tempo de viagem de ida e volta (*Two-Way Travel-Time*), expresso em nano segundos (ns) [18]. A título de exemplo, encontra-se representado na Figura 3.2 a metodologia de aquisição de dados no terreno e o seu modo de reflexão.

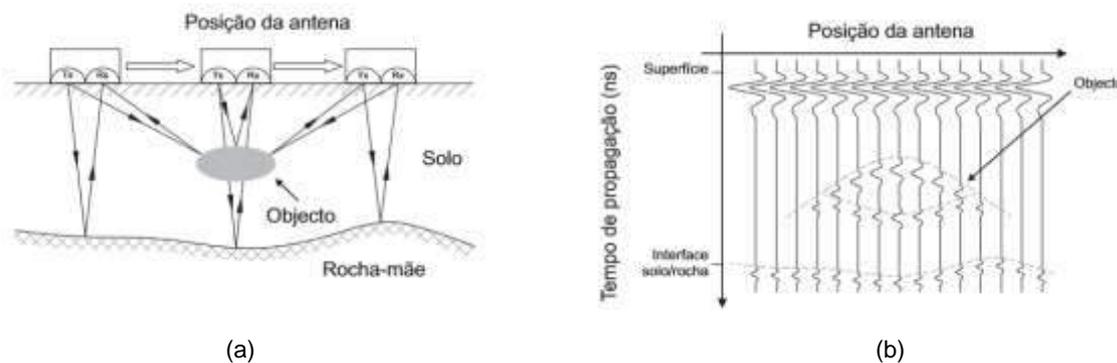


Figura 3.2 Aquisição de dados no terreno (a) e perfil resultante (b) [18]

Este equipamento permite assim não só detetar e analisar elementos isolados no subsolo, tais como condutas ou cabos elétricos, como também é habitualmente utilizado para obter um perfil contínuo do terreno, em particular das camadas mais superficiais. Tal é possível devido ao facto de nas diferentes posições se obterem traços que traduzem a evolução da amplitude do sinal emitido ao longo da profundidade, que quando justapostos formam um diagrama de radar (ou radargrama) [18].

3.3 Princípios fundamentais do método

3.3.1 Propriedades eletromagnéticas dos materiais

Na prática, todos os meios naturais conhecidos são mais ou menos condutores e, por isso, mais ou menos absorventes de energia eletromagnética, isto é, as ondas que neles se propagam diminuem de amplitude à medida que aumenta a distância percorrida em relação à fonte [2]. Apenas o vácuo pode ser considerado um meio absolutamente “transparente”, no qual a amplitude da onda é constante ao longo da direção de propagação. No entanto, certos meios de baixa condutividade elétrica são, na prática, considerados como meios transparentes [2], como é o caso do ar, no qual a atenuação é praticamente nula, comparativamente a outros de maior condutividade, como os materiais geológicos.

De acordo com a bibliografia da especialidade, os fundamentos teóricos deste método de prospecção provêm da Teoria das Ondas Eletromagnéticas ou Teoria do Eletromagnetismo, estabelecida por Maxwell em 1880. Conforme já foi referido, os materiais geológicos, por serem meios condutores do ponto de vista eletromagnético, têm a capacidade de propagar energia eletromagnética. Esta propagação, por sua vez, depende essencialmente de três parâmetros: 1) permeabilidade magnética, 2) constante dielétrica e 3) condutividade elétrica dos materiais; que se irão definir de seguida.

1) Permeabilidade magnética

A permeabilidade magnética quantifica o magnetismo de um material, ou seja, é uma grandeza que exprime a diferença magnética existente entre diferentes materiais. Como tal, esta propriedade está diretamente relacionada com a presença de metais num dado material, sendo mais significativa naqueles com elevado teor metálico.

Tal como foi dito anteriormente, em teoria, apenas o vácuo é considerado como um meio “transparente”, isto é, livre de magnetismo, mas na prática, é usualmente admissível considerar os materiais da subestrutura de uma via-férrea como não magnéticos; o que faz com que desse modo a propagação do sinal GPR não seja afetada [19]. Contudo, deve-se ter em atenção a existência de elementos metálicos (carris) presente nas infraestruturas ferroviárias, daí este fenómeno não deve ser ignorado.

2) Constante dielétrica

A propriedade eletromagnética com maior relevo é a constante dielétrica relativa, também designada por valor dielétrico ou permissividade dielétrica relativa. Esta grandeza adimensional é definida pela razão entre a permissividade absoluta do material, ϵ_m , e a do vácuo ($\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ (Farad por metro)), definida pela seguinte expressão:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_m}{\epsilon_0} \quad (4)$$

A constante dielétrica relativa de um material controla a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas, assim como a reflexão e a refração do sinal nos meios de baixa condutividade e sem permeabilidade magnética. Por questões de simplificação, este parâmetro será denominado ao longo do presente trabalho apenas por constante dielétrica.

De acordo com o quadro apresentado em anexo, verifica-se que a constante dielétrica dos solos e das rochas pode variar entre 3 e 40, este facto deve-se à velocidade de propagação depender fortemente do teor em água presente no meio [2], assim tem-se para a água uma constante dielétrica de 81 enquanto para a maior parte dos materiais secos esta varia entre 4 e 8. De facto, a presença de água promove uma grande absorção do sinal emitido e, como resultado, afeta significativamente a constante dielétrica dos materiais a ensaiar. Conforme se pode ver na Tabela 3.1, para um balastro sob a presença de água, os valores de ϵ_r são superiores comparando ao seu estado seco, independentemente do tipo de balastro em causa.

Tabela 3.1 Variação da constante dielétrica em função do tipo de balastro considerando antenas com diferentes frequências [5] [2]

Tipo de Balastro	Condição	Constante dielétrica (ϵ_r)	
		Antena de 500 MHz	Antena de 900 MHz
Calcário limpo	seco	5,3	5,0
	molhado	7,2	6,4
Granito limpo	seco	4,3	3,7
	molhado	4,8	3,8
Calcário contaminado (c/ partículas finas)	seco	15,4	12,5
	molhado	16,0	13,2
Calcário contaminado (c/ partículas médias)	seco	10,0	9,6
	molhado	11,2	11,2
Calcário contaminado (c/ partículas grossas)	seco	7,6	6,4
	molhado	8,6	7,5

Observa-se, efetivamente, que os valores mais baixos deste parâmetro estão relacionados aos solos secos (areais secas) e às rochas (calcários e granitos) e os mais elevados às argilas e solos saturados (areias saturadas) [2]. Assim, alguns autores concluíram que a constante dielétrica do material da camada de balastro pode variar significativamente em função do seu estado, no que diz respeito à contaminação e teor em água, sugerindo valores entre 2 e 6 para o balastro limpo e entre 6 e 15 para o balastro contaminado.

Verifica-se assim que o radar de prospecção poderá ser uma ferramenta bastante útil na detecção de problemas de drenagem e eventualmente na detecção de alterações significativas do teor em água dos materiais. Okrasinski estudou o efeito de algumas características dos materiais, como a porosidade e o teor em água, na constante dielétrica [20], tendo concluído que esta grandeza diminui com o aumento da porosidade (independentemente do tipo de solo) e aumenta com o teor em água. Os resultados são apresentados graficamente no Anexo I.

3) Condutividade elétrica

A condutividade elétrica (σ) de um material traduz-se pela sua capacidade de transmitir ou conduzir corrente elétrica, sendo por esse motivo utilizada para especificar o carácter eléctrico de determinado material [16]. Deste modo, tem-se:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (5)$$

Em que ρ corresponde à resistividade elétrica do material, também designada por resistência elétrica específica, caracterizando-se como a oposição de um material ao fluxo de corrente elétrica, ou seja, quanto mais baixa for a resistividade mais facilmente o material permite a passagem de uma carga elétrica. No Sistema Internacional (SI), a unidade considerada para a resistividade é o ohm metro (Ωm) e para a condutividade elétrica tem-se (S/m) [21].

A condutividade elétrica é então o parâmetro responsável por controlar a profundidade de penetração das ondas eletromagnéticas e também a reflexão do sinal nos meios de elevada condutividade. É notório que na presença de alguns materiais de elevada condutividade elétrica, os sinais podem ser atenuados ou absorvidos, logo não são suscetíveis de serem atravessados pelas ondas eletromagnéticas, provocando a diminuição substancial da profundidade de penetração do GPR [2]. Destacam-se entre esses materiais: o metal, a água do mar e algumas argilas, que podem limitar as profundidades do radar da ordem de 1m, mesmo para frequências mais baixas. Contrariamente, os solos arenosos e algumas rochas apresentam uma condutividade muito menor, fazendo com que as profundidades de penetração das ondas possam atingir algumas dezenas de metros.

Por outro lado, esses materiais que apresentam elevados valores de condutividade elétrica (metais), o seu efeito de atenuação das ondas é tão forte que eles se podem considerar como sendo opacos à energia eletromagnética [2]. Outra característica destes materiais é o facto de serem extremamente refletores, apesar de apresentarem uma elevada atenuação de energia.

Importa ainda salientar que estes dois últimos parâmetros, condutividade elétrica e constante dielétrica, são dependentes da frequência. Pelo que, muitas vezes, são expressos como números complexos.

$$\sigma = \sigma' - i\sigma'' \quad (6)$$

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'' \quad (7)$$

Verificou-se que para valores de frequência baixos, isto é, abaixo de 400 MHz, a constante dielétrica diminui bruscamente com o aumento da frequência embora para frequências superiores a 1 GHz esta parece não ter qualquer efeito no valor dielétrico [3]. Por outro lado, a condutividade aumenta linearmente com o aumento da frequência, para valores desta superiores a cerca de 200 MHz [20].

3.3.2 Equações subjacentes

No âmbito das infraestruturas de transporte, um dos objetivos de uma investigação com o radar de prospecção é a medição das espessuras das camadas. Atendendo a que a onda em análise percorre duas vezes o mesmo percurso (dupla trajetória), considerando o intervalo de tempo decorrido desde a emissão da onda até à sua receção (t), a relação entre a profundidade da interface (s) e a respetiva velocidade de propagação da onda no meio (v) é determinada por:

$$s = \frac{v \times t}{2} \quad (8)$$

Por sua vez, a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas (v) depende da constante dielétrica (ϵ_r) do meio em análise, podendo ser aproximada pela seguinte expressão:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (9)$$

Em que, $c = 3 \times 10^8 m/s$ representa a velocidade da luz no vácuo. Dada a elevada velocidade de propagação das ondas, é recorrente apresentar-se este parâmetro em metros por nano segundo ($c = 0,3 m/ns$).

Na aplicação do radar à prospecção de terrenos, ao nível da interface, verifica-se que uma percentagem da onda é refletida enquanto a restante continua a propagar-se, penetrando na camada seguinte. Este aspeto é expresso através de dois parâmetros designados por: coeficiente de reflexão (k), que pode variar entre -1 e +1, sendo ϵ_1 o valor dielétrico da camada superior da interface e ϵ_2 o valor dielétrico da camada inferior, e coeficiente de penetração (R), representados pelas expressões:

$$k = \frac{\sqrt{\epsilon_{r2}} - \sqrt{\epsilon_{r1}}}{\sqrt{\epsilon_{r2}} + \sqrt{\epsilon_{r1}}} \quad (10)$$

$$R = 1 - k \quad (11)$$

O sinal refletido apresenta assim uma amplitude variável, dependendo da diferença entre as constantes dielétricas relativas dos diferentes meios. Importa ainda salientar que quando se verifica que $k < 0$, ou seja, $\epsilon_{r2} < \epsilon_{r1}$, a amplitude de “pico” da camada inferior apresenta um sinal contrário ao da camada superior, por sua vez quando $k > 0$, significando, $\epsilon_{r2} > \epsilon_{r1}$, as amplitudes de “pico” de ambas as camadas tem o mesmo sinal (positivo ou negativo). Quando $k = -1$ considera-se que a camada 2 (inferior) é um absorvente perfeito (nada é refletido), enquanto $k = +1$ implica que a camada inferior é um refletor perfeito (metal).

3.3.3 Propagação da onda no meio

Sempre que as ondas eletromagnéticas atingem uma interface entre duas camadas com propriedades elétricas distintas, sofrerão diversos fenómenos que afetam o seu comportamento (reflexão, dispersão, refração e difração). No âmbito desta análise, a reflexão da onda é o fenómeno mais importante e por esse motivo será o foco principal.

Como se viu, o radar capta e regista apenas a percentagem refletida da onda. Assim, quanto maior for a diferença entre as propriedades elétricas dos diferentes meios, maior é a reflexão para a superfície e maior será a amplitude do sinal lido pelo equipamento.

A energia refletida atingirá então o recetor em diferentes momentos em função dos valores dielétricos dos materiais detetados durante a propagação da onda, formando uma imagem mais ou menos nítida conforme o coeficiente de reflexão. Esta reflexão distingue-se, em geral, por uma variação de amplitude do sinal significativa, apresentando uma forma de onda destacável relativamente à parte restante. As amplitudes são então gravadas como uma função tempo e um traço é gerado.

A título de exemplo, apresentam-se na Figura 3.3 os resultados obtidos pelo radar de prospecção correlacionando os diferentes coeficientes de reflexão com as amplitudes do sinal registado.

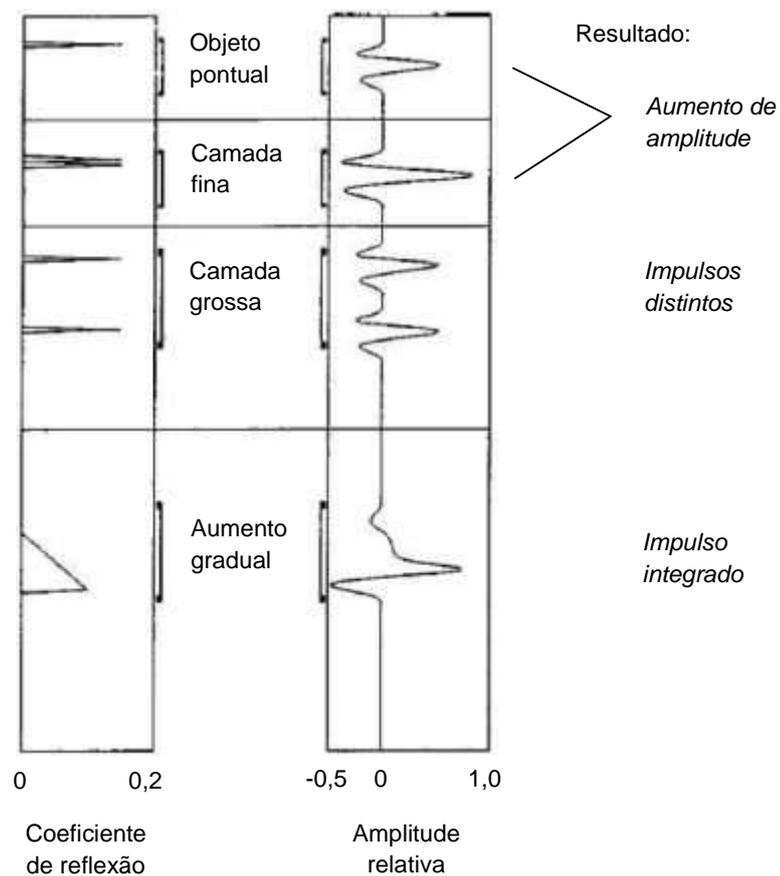


Figura 3.3 Exemplos de reflexões causadas por interfaces comuns [3]

Da figura anterior, observa-se claramente a localização do objeto na primeira situação, através da reflexão que é gerada é possível então determinar-se a profundidade a que este se encontra.

Na situação representada logo a seguir, é visível também um único impulso embora com maior amplitude, este traduz as reflexões provenientes do topo e da base da camada fina, representada à esquerda; uma vez que estas são tão próximas, o equipamento apenas consegue detetar a sua presença, inviabilizando a determinação da espessura correspondente.

Por outro lado, na presença de uma camada grossa, através do radar é possível se identificar uma interface nítida entre as duas camadas, representadas por dois impulsos distintos que caracterizam os limites (superior e inferior) da segunda camada. Deste modo, consegue-se determinar a profundidade a que esta nova camada se inicia bem como a sua espessura, este caso corresponde à situação ideal quando se recorre a este tipo de método.

A última situação, em que se verifica um aumento gradual do valor dielétrico, sugere a existência de uma camada com níveis crescentes de teor em água [3]. Tal acontece, em situações que se verifica a existência da contaminação do balastro ferroviário com solos finos (em profundidade), por exemplo. Não existe uma fronteira que delimite a camada de balastro limpo da que está muito contaminado, mas antes um aumento progressivo do grau de contaminação; fator que se deve ter em conta aquando da interpretação dos resultados de uma ferrovia.

De notar que, a reflexão típica proveniente do sinal GPR traduz-se pela presença de um “pico” negativo, seguido de um positivo e finalizando, novamente, com um “pico” negativo; salientando-se que uma degradação gradual nas camadas de apoio dificulta a sua visualização, sendo de fulcral importância a experiência e sentido crítico do intérprete/operador. Contudo, este tema será aprofundado mais adiante.

3.4 Aplicações do Radar de Prospecção

O radar de prospecção, desde o início, tem sido utilizado com vários propósitos, em todo o tipo de investigações. De forma a evidenciar as potencialidades deste equipamento, destacam-se de seguida os seus diversos campos de aplicação:

- ❖ **Geologia** – este sistema de radar oferece uma solução precisa e não destrutiva no que diz respeito ao mapeamento do subsolo. Deste modo, é possível localizar recursos de interesse e camadas em tempo real. Ao examinar as condições do solo e as estruturas naturais encontradas sob a superfície da Terra, torna-se uma fonte de informação útil não só para a Geologia como também para a agricultura e silvicultura [22].
- ❖ **Arqueologia e Ciência Forense** – nestas áreas o radar de prospecção permite fornecer diretrizes básicas para os investigadores forenses/arqueólogos, documentando as alterações de condutividade de corpos/objetos enterrados. Sendo vital uma deteção e extração com o mínimo impacto possível, o radar possibilita que as escavações se

tornem mais eficazes e rápidas, permitindo assim que o corpo/objeto permaneça intacto e evitando escavações aleatórias [23] [24].

- ❖ **Astronomia** – sabe-se que o vácuo é o meio mais propício à propagação das ondas eletromagnéticas. Daí a sua importância para os astrónomos, na medida em que possibilita a localização de asteroides e cometas, a investigação do subsolo da Lua e de Marte e ainda a análise da ionosfera (camada superior da atmosfera) que devido à sua composição, reflete as ondas de rádio [3].
- ❖ **Reconhecimento e Cartografia** – no que diz respeito à estratigrafia do subsolo; ao nível freático; ao reconhecimento de zonas contaminadas; à batimetria em água doce (uma vez que a água presente nos rios e lagos é um meio para o qual o radar é muito eficaz, devido à homogeneidade e ao seu baixo teor em minerais, permite ao GPR produzir resultados nítidos até profundidades consideráveis (cerca de 20m)) [3]; e ainda possibilita traçar o perfil de massas de gelo (este método mostrou ser também muito preciso na determinação da espessura de gelo, embora a interpretação possa ser dificultada pela existência de uma camada de água no seu interior) [2].

Este radar de prospecção é ainda utilizado na exploração mineira, estudos ambientais, topografia, entre outros. Em Portugal, o radar tem sido aplicado muito recentemente na resolução de problemas estruturais e na prospecção de infraestruturas enterradas. Salienta-se assim as principais aplicações deste método no âmbito da engenharia.

- ❖ **Auscultação de pavimentos** – particularmente nas infraestruturas de transporte, é uma técnica muito útil no que diz respeito à determinação da espessura das diversas camadas. Requer ainda um estudo mais aprofundado na aplicação relativa à localização de vazios no interior da subestrutura, à deteção de fissuras em pavimentos asfálticos e ainda à determinação da heterogeneidade dos pavimentos (estradas, aeroportos e vias férreas) em relação ao seu teor em água, compactação e segregação dos agregados [25].
- ❖ **Deteção e localização de elementos enterrados** – em estruturas de betão armado permite localizar os varões de aço e identificar a espessura do recobrimento das armaduras [2]. Há resultados que demonstram ainda que este equipamento é adequado: na deteção de barras de pré-esforço a profundidades elevadas; na localização de cabos elétricos e condutas de água, tornando possível mapear os sistemas de abastecimento de água, esgoto e gás natural (facilitando assim os trabalhos de escavação e a realização de fundações em zonas urbanas); na identificação da geometria de elementos de alvenaria (especialmente importante em estruturas antigas, ao verificar a sua estabilidade através da deteção da espessura desses elementos e da sua uniformidade), e por último, é também eficaz na deteção da presença de humidade [18].

- ❖ **Pontes** – ao serem estruturas muito sensíveis faz com que sejam alvo de manutenção mais apertada, assim o aparelho GPR permite identificar várias causas de defeitos nestas estruturas, nomeadamente, a fissuração no pavimento do tabuleiro, uma deficiente compactação nos aterros de aproximação à ponte e ainda o arrastamento de areias nas fundações, provocado pela corrente do rio [3] [22].

- ❖ **Observação de obras** – é bastante útil no que diz respeito ao controlo de avanço de trabalhos subterrâneos e à verificação da qualidade dos trabalhos de reabilitação [2].

3.5 Considerações finais

Com a elaboração deste capítulo pretendeu-se, em primeira instância, criar um primeiro contacto com o equipamento do radar de prospecção, tanto ter a noção do seu desenvolvimento ao longo dos anos como perceber os aspetos gerais do seu modo de funcionamento.

De seguida, com o intuito de focar nos princípios fundamentais do método, houve a preocupação de explicitar alguns conceitos e respetivas equações que se consideram essenciais para o estudo com o radar. Por fim, salienta-se a diversidade de aplicações deste equipamento nas mais variadas áreas.

Capítulo 4

4. O RADAR DE PROSPECÇÃO NA VIA-FÉRREA

4.1 Veículo de Inspeção da Via

Cada vez mais, conhecer as condições de uma via-férrea é fundamental para garantir as condições de conforto e segurança durante a circulação dos veículos. Para tal, existem diversos métodos a que a engenharia ferroviária recorre para caracterizar o estado da via relativamente ao seu desempenho global.

É recorrente fazer-se uma inspeção regular da via com a medição dos seus parâmetros geométricos, como a avaliação da condição do carril e mais recentemente a avaliação das camadas da infraestrutura com recurso ao radar de prospecção. Importa ainda referir que existem diferentes métodos, uns que permitem determinar as características físicas e mecânicas da superestrutura, e outros que, por sua vez, visam caracterizar os elementos da subestrutura [2].

A caracterização desses elementos pode fazer-se através da interpretação de resultados de ensaios realizados *in situ* complementados por ensaios realizados em laboratório. Adicionalmente, para detetar situações anómalas e recolher elementos importantes que complementam a informação obtida por esses processos, salienta-se a importância de uma inspeção visual.

A Infraestruturas de Portugal, S.A. é a entidade responsável pelas redes rodoviária e ferroviária nacionais, estando a seu cargo a realização das inspeções que caracterizam o estado da via. Executando de forma rápida, não destrutiva e com elevada precisão, recorre para esse efeito ao Veículo de Inspeção da Via (VIV) – EM 120, apresentado na Figura 4.1.



Figura 4.1 Veículo de inspeção geométrica de via - EM 120 [4]

O VIV EM120, atualmente utilizado de forma recorrente em Portugal, permite obter os dados relativos às sucessivas posições dos carris no espaço tridimensional, não fazendo essas medições diretamente em pontos fixos e sem contacto físico com a via durante o processo de medição [7]; este veículo de inspeção permite ainda registar os diferentes parâmetros sob a forma numérica e gráfica em tempo real, comparando-os com os valores limites de tolerância especificados nas normas ferroviárias.

Este equipamento de monitorização da plataforma da via contém um sistema GPR incorporado, daí a sua importância para o presente trabalho. Na Figura 4.2, pode ver-se um exemplo do funcionamento deste sistema de radar.



Figura 4.2 Equipamento radar de prospecção da I.P., SA [7]

Em geral, um sistema de radar moderno funciona com cinco componentes principais, nomeadamente: duas antenas (uma transmissora (T) e uma recetora (R)), uma unidade de controlo, uma unidade de visualização e outra de armazenamento de dados – ver Figura 4.3.

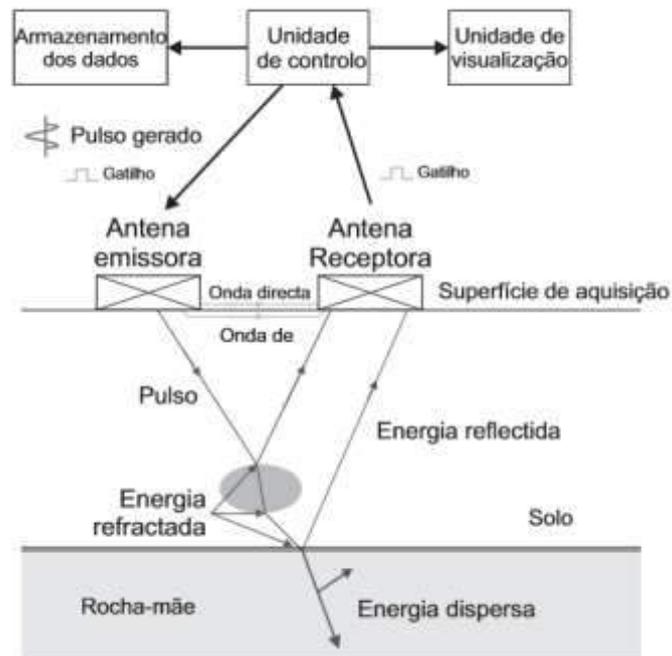


Figura 4.3 Modelo de funcionamento do sistema do Radar de Prospecção [18]

Deste modo, a unidade de controlo gera e configura um sinal recorrendo a um transmissor e recetor, contabilizando o tempo e medindo a amplitude dos sinais recebidos. Por sua vez, as antenas emitem a radiação eletromagnética, registando as reflexões ocorridas no meio e transformando estas reflexões em informação digital que é armazenada num dispositivo próprio para posterior processamento [26].

De realçar que apenas as versões mais atuais deste tipo de equipamentos conseguem fazer a aquisição digital de dados, os quais depois de processados, normalmente em programa de cálculo dedicado, permitem obter um registo gráfico da subsuperfície, como se verá mais a frente.

Previamente à realização do ensaio, deve ser definido o número de alinhamentos de medição. A situação mais comum, no âmbito das infraestruturas ferroviárias, envolve três alinhamentos de medição paralelos, um entre os carris e um de cada lado dos carris, demonstrado na Figura 4.4. Porém, caso se opte por uma única linha de medição, esta deve ser realizada entre carris.

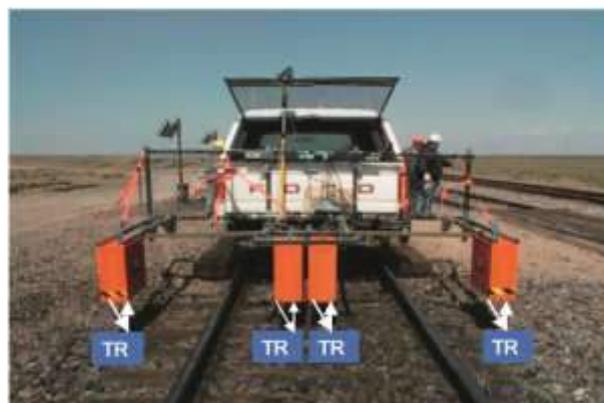


Figura 4.4 Equipamento GPR com antenas suspensas [27]

Neste contexto, verifica-se que o GPR é um dos equipamentos mais utilizados e mais úteis no âmbito das infraestruturas de transporte. Particularmente nas ferrovias, é um sistema que auscultando em profundidade permite: i) determinar a espessura das camadas que compõem a estrutura da via; ii) identificar troços com balastro contaminado; iii) detetar secções da via com problemas de drenagem; e ainda iv) localizar intrusões (cabos, tubos, etc).

Deste modo, tendo em conta o modelo de funcionamento do sistema de radar, em que as antenas são suspensas sobre a superfície de balastro, é possível realizar ensaios na via-férrea adaptando o radar a um veículo ferroviário, possibilitando assim medições quase em contínuo ao longo da via (ver Figura 4.2).

4.2 Sistema de antenas utilizado na via-férrea

No que diz respeito à seleção da frequência das antenas é preciso ter em consideração algumas características, relativamente: ao tipo de aplicação, à profundidade e dimensão dos potenciais alvos e ao tipo de ambiente do local em análise [18]. Para facilitar o leitor e dar uma noção da frequência das antenas em utilização, ilustra-se na Tabela 4.1 as suas diversas profundidades de penetração, as resoluções esperadas e as aplicações correntes, em condições adequadas de propagação.

Tabela 4.1 Características típicas das antenas de radar – adaptado [5] [18]

Frequência (MHz)	Máx. profundidade de penetração (m)	Resolução	Aplicações correntes
10 a 50	10 a 50	Baixa	Geologia, geotecnia mineira e ambiente
100	5 a 20		
200	2 a 7	Baixa a média	Geotecnia, ambiente, arqueologia e engenharia
400	1 a 4	Média a alta	Geotecnia, arqueologia e engenharia
500			
900	0,5 a 1,5	Alta	Engenharia, infraestruturas de transporte, obras de arte, edificado
1000			
>1500	0,4 a 0,5	Muito alta	

A escolha adequada das antenas é determinante nos resultados obtidos em cada ensaio, esta seleção depende tanto da resolução pretendida como da máxima penetração desejada. Em geral, o tamanho das antenas depende da frequência de operação do radar, ou seja, quanto maior for a frequência, mais pequenas são as antenas, maior é a resolução e menor é a profundidade de auscultação.

Na prática, em investigações de infraestruturas de transporte, existem dois tipos de antenas a que normalmente se recorre: antenas suspensas (*horn antennas* ou *air-coupled antennas*) e antenas de contacto (*ground coupled antennas*). As primeiras são, usualmente, posicionadas entre 40 a 50cm sobre a superfície de balastro (ou o meio a analisar) enquanto as últimas são acopladas ao solo/superfície.

Para a aquisição dos dados do radar de prospecção pode ainda recorrer-se a dois tipos de equipamento: equipamento biestático, em que o sistema de radar é composto por duas antenas separadas (uma emissora e outra recetora), ou a um equipamento monoestático, que como o nome sugere, a mesma antena recebe e emite os sinais.

Além das características mencionadas anteriormente, é ainda de realçar as diferenças do sinal eletromagnético proveniente de cada sistema de antenas, em termos de polaridade e amplitude, observe-se a figura seguinte.

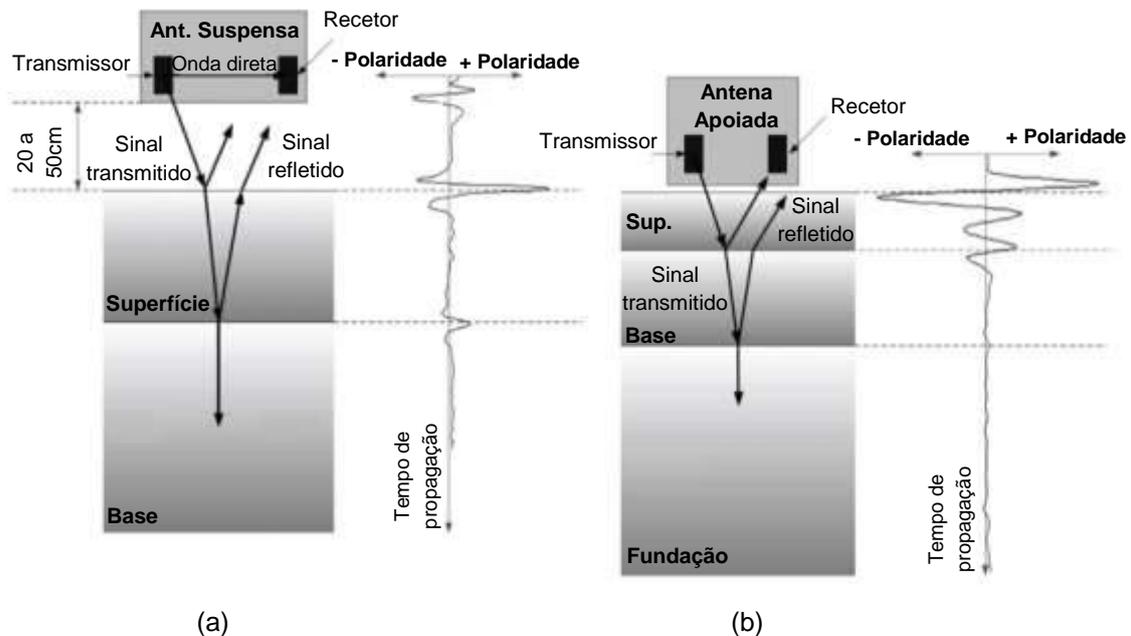


Figura 4.5 Diferença do sinal entre antenas suspensas (a) e apoiadas (b), com respetiva polaridade, adaptado [40]

Assim, conclui-se, de um modo geral, que a máxima profundidade de aplicação do radar de prospecção depende das características do equipamento (da frequência e do poder de emissão, do ganho e da eficiência da antena e da sensibilidade do recetor), das características do objeto ou meio a localizar e das propriedades eletromagnéticas dos materiais a atravessar [2].

4.3 Procedimentos de preparação do ensaio

De facto, existem algumas técnicas de calibração que se devem aplicar antes de se realizar qualquer recolha de dados com o radar de prospecção. É perceptível que uma má calibração poderá originar gravosos erros de interpretação ou até mesmo impossibilitar o processamento dos dados, devido à incompatibilidade entre a calibração e os ficheiros do GPR.

Assim, após a montagem do equipamento, este requer cerca de 15 a 20 minutos para aquecer, é importante que este requisito seja cumprido de modo a evitar desvios de amplitude e/ou tempo nos ficheiros de calibração [19]. Ainda antes da calibração do sistema ou durante o aquecimento do equipamento, devem definir-se alguns parâmetros, dos quais se destacam [28]: 1) a configuração das antenas; 2) os parâmetros da imagem e definições de ganho.

Quanto à configuração das antenas, deve ser especificado no programa o tipo de antena que será utilizada (incluindo a frequência), a entrada na qual será conectado o cabo e a velocidade de recolha dos dados [3] [28].

Relativamente aos parâmetros da imagem e às definições de ganho, salientam-se os seguintes aspetos:

✓ **Filtros digitais**

A técnica mais comum de remoção/redução do ruído é a aplicação de filtros, estes têm assim como objetivo principal “limpar” o sinal emitido, permitindo a emissão de ondas apenas num determinado intervalo de frequências.

De facto, muitas unidades de controlo permitem tratar o sinal com filtros durante o processo de recolha de dados, através da eliminação de frequências muito baixas ou muito altas, de modo a assegurar um funcionamento adequado do equipamento e melhorar a imagem daí obtida. Contudo, deve-se ter uma aplicação cuidada na utilização destes filtros, de modo a não remover reflexões de possíveis pontos de interesse.

Na prática, considera-se que esses filtros podem ser de dois tipos, nomeadamente: filtros de resposta a impulso infinita ou IIR (do inglês *Infinite Impulse Response*) e filtros de resposta a impulso finita ou FIR (*Finite Impulse Response*). Estes filtros podem ainda ser subdivididos conforme a parcela do sinal que é modificada pela sua aplicação [3], das classes existentes salientam-se de seguida aquelas que são mais comuns em programas de processamento e que foram tidas em consideração no presente trabalho:

- **Passa-alto** (*High-pass*): filtros que permitem a “passagem” de frequências superiores à estabelecida;
- **Passa-baixo** (*Low-pass*): aqueles que permitem a “passagem” de frequências inferiores à estabelecida.

Os primeiros atenuam os sinais de baixa frequência e permitem a passagem dos sinais de frequência mais alta (por vezes são chamada de filtros de baixa frequência), enquanto os últimos atenuam os sinais de alta frequência, permitindo a passagem dos sinais de frequências mais baixas (denominados, muitas vezes, por filtros de alta frequência).

Recomenda-se assim, para antenas suspensas, que o primeiro seja metade da frequência central da antena e o segundo o triplo; enquanto para antenas de contacto, considera-se 1/5 e o quádruplo do valor da frequência central, respetivamente [19]. Não esquecendo que cada fabricante do radar de prospecção tem as suas próprias recomendações a respeito das configurações/definições de filtros.

✓ Janela de amostragem (em ns)

Antes de se fazer o processamento dos ficheiros, um dos primeiros parâmetros a ser definido é a janela de visualização (ou também designada usualmente por janela de amostragem/tempo) que corresponde ao intervalo da amostra (tempo de medição) captado pelo equipamento. Neste sentido, é perceptível que este parâmetro depende da frequência das antenas utilizadas e consequentemente da profundidade alcançada durante o ensaio; sendo, por esse motivo, muitas vezes expresso como frequência de amostragem.

Importa salientar que este tempo de medição depende essencialmente da espessura que se pretende avaliar. No entanto, por norma, são considerados 20 ns para antenas de alta frequência e para antenas de frequências mais baixas, uma vez que dependem da máxima espessura a ser investigada, adota-se 1/3 a mais que a profundidade alvo [19]. Segundo Saarenketo, para antenas acopladas ao solo (400 MHz – 600 MHz) normalmente a janela de visualização utilizada é entre 60 a 80 ns [19].

Esta janela de amostragem tem, deste modo, como principal objetivo selecionar o número de nano segundos necessário de forma a obter-se uma amostra que contenha a informação relevante para a análise, ou seja, que englobe tanto a reflexão registada à superfície como as do topo e da base da camada a ser analisada (neste caso, a camada de balastro). Deve-se ter em atenção este fator, de modo a retirar o maior partido do equipamento e evitar considerar-se um valor incorreto no processamento.

A escolha da janela deve então ser bastante cuidada, por vezes para se conseguir visualizar melhor o “scan” tende-se a escolher um “time-window” reduzido (maior resolução), no entanto, isso poderá comprometer a visualização, não se captando características mais profundas e perdendo-se informação importante, como por exemplo a distinção de interfaces [5].

Observe-se a figura seguinte em que se consideram duas abordagens para o mesmo ficheiro: a primeira em que se considerou uma janela de tempo com 15 ns (Figura 4.6 (a)) e outra com 25 ns (Figura 4.6 (b)).

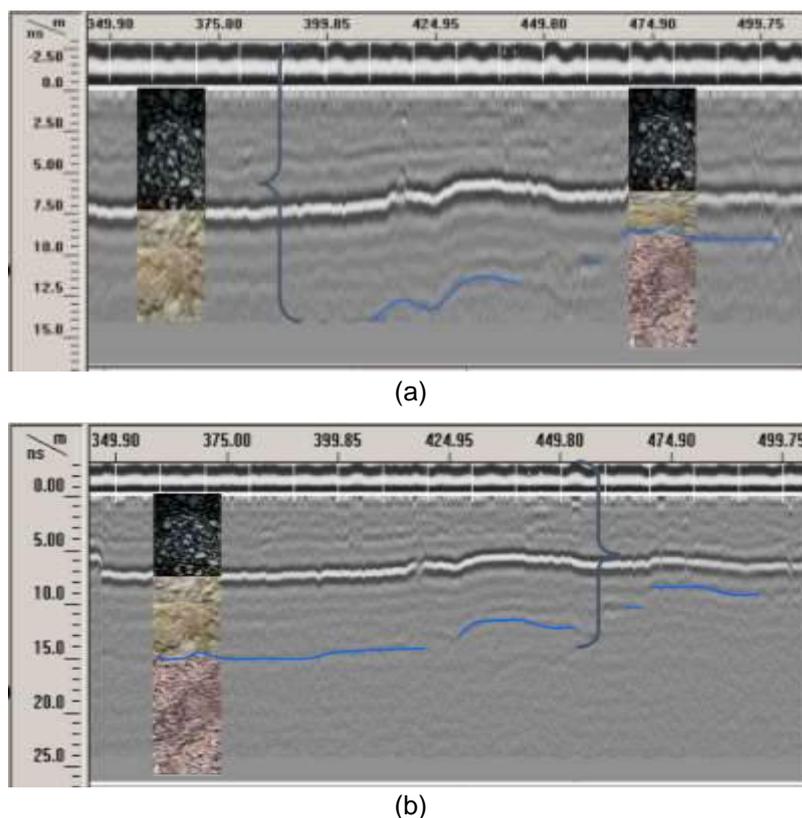


Figura 4.6 Exemplo da seleção de diferentes janelas de amostragem, com 15ns (a) e com 25ns (b) [44]

De referir que, geralmente, os fabricantes deste tipo de equipamentos aconselham qual a gama de intervalos de amostragem adequado para a realização dos ensaios. Logicamente que o objetivo desse ensaio será fundamental na escolha deste parâmetro.

✓ **Amostras por “scan”**

Em infraestruturas de transporte, o valor recomendado para os ensaios é de 512 amostras por scan [19]. Na prática, é também frequente utilizar-se 1024 amostras [29], tal deve-se ao novo sistema de radar ser caracterizado por uma maior capacidade de armazenamento, influenciando deste modo a densidade da imagem.

✓ **Leituras por metro (scans/metro)**

O número de leituras por metro é o parâmetro mais importante durante a recolha de dados e depende essencialmente do objetivo do ensaio. Geralmente, na maior parte dos ensaios considera-se quatro leituras por metro, correspondendo a uma leitura por cada 25cm. No entanto, no caso de pavimentos rígidos, devido a absorção do sinal GPR por parte desses materiais, é aconselhável aumentar este número de leituras, por forma a obter o máximo de informação possível [28].

Assim, no âmbito de investigações em estradas, ferrovias ou aeroportos, um valor da ordem das 4 a 10 leituras por metro é razoável [3], uma vez que permite identificar na estrutura, defeitos e objetos pontuais como cabos e condutas.

Apesar de alguns autores considerarem que a velocidade a que se realiza o ensaio para o levantamento dos dados é desprezável, na medida em que não afeta os próprios ficheiros, tal não é verdade. A velocidade de execução do ensaio é definida pela frequência de aquisição de dados da antena utilizada e tem-se discutido a influência que esta possa ter na precisão dos resultados, comprovando-se que menores erros estão associados às velocidades mais baixas [3]. Aconselha-se assim, caso não existem condicionantes maiores, a realização do ensaio a velocidades reduzidas.

Ainda para combater este fenómeno e evitar obter informação com possíveis erros, é aconselhável fazer-se uma acoplagem ao equipamento com um dispositivo de controlo da velocidade (roda medidora). Sempre que a velocidade é excedida, a unidade de controlo avisa o operador através de um sinal sonoro, controlando-se assim o número de leituras por metro.

✓ **Amplitude de ganho**

No sentido de se otimizar a visibilidade da onda durante o processo de recolha de dados, muitas vezes é necessário amplificar o sinal durante a medição. Este processo é possível multiplicando-se os dados por uma função de ganho (constante, linear ou exponencial).

Esta função de ganho é então utilizada para compensar o efeito de diminuição da onda inerente ao sinal [29]. De facto, a amplitude do sinal diminui com o aumento da distância de propagação da onda e com a condutividade elétrica do meio. A finalidade do uso destes ganhos é destacar reflexões de interesse, melhorando a imagem posteriormente obtida na unidade de visualização. A título de exemplo, observa na Figura 4.7 um ficheiro em “bruto” de uma infraestrutura rodoviária (imagem superior) e o mesmo ficheiro após a aplicação do ganho (imagem inferior).

Alguns *softwares* permitem a aplicação de ganhos apenas durante a visualização dos dados, enquanto noutros programas, a alteração do sinal é permanente. Aconselha-se que esta amplificação não seja demasiado grande, por forma a evitar a saturação do sinal registado e assim perder informação [29].

É ainda importante referir que as funções de ganho linear e exponencial são utilizadas com o objetivo de melhorar a imagem das interfaces situadas essencialmente a grandes profundidades, sem obviamente saturar o sinal da reflexão da superfície. Contudo, deve-se ter bastante precaução pois certas funções podem causar “flutuações artificiais” de amplitude [29], que facilmente podem ser interpretadas erradamente como mudanças de constante dielétricas.

Para antenas suspensas, a função de ganho habitualmente utilizada é uma função constante [29]. A amplitude é escolhida com base na intensidade da reflexão da superfície. Idealmente, a reflexão da superfície deverá ser equivalente a aproximadamente 50% da máxima amplitude

registada. Deve também ser verificado se a adoção desta função não conduz à saturação do sinal nas situações em que a antena é calibrada com uma superfície metálica. Assim, o ajuste de ganho deve ser definido pela reflexão da placa metálica [3], garantido que a imagem não é “cortada”.

Para antenas acopladas ao solo, as funções lineares são normalmente as adotadas [29]. Pretende-se assegurar que todo o ficheiro permanece com uma amplitude menor que a máxima atingida, deste modo, é recomendado selecionar uma função em que a amplitude da onda direta seja 2/3 do valor máximo registado.

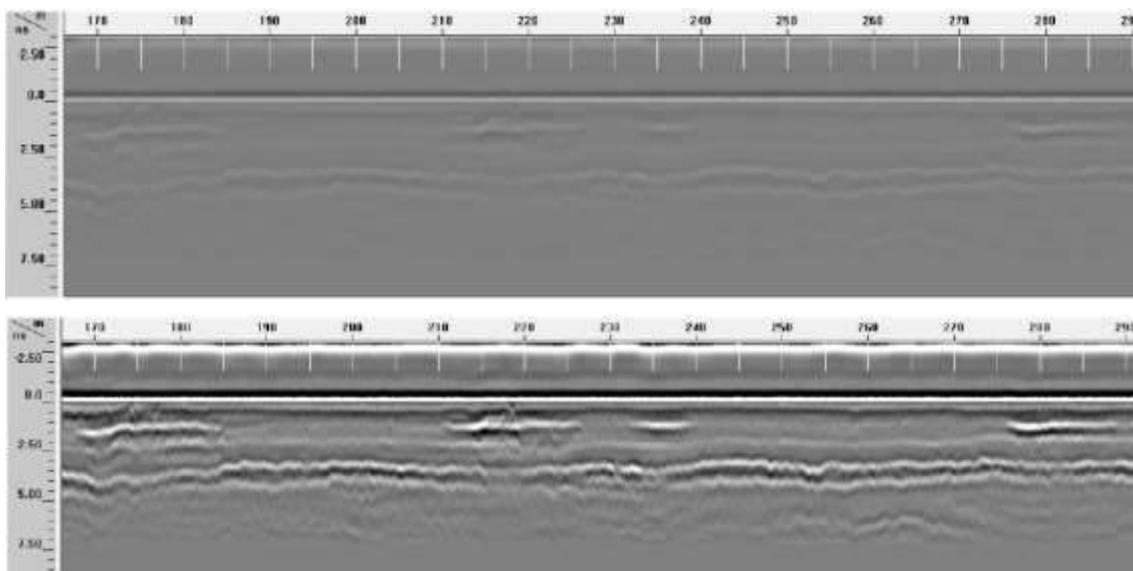


Figura 4.7 Exemplo da aplicação de um ganho: ficheiro GPR de origem (em cima) e visualização após o ganho (em baixo) [30]

Assim, é importante salientar que estes parâmetros referidos anteriormente estão relacionados com as características das antenas e dependem não só das condições do ensaio como também da dimensão das características que devem ser detetadas aquando da realização desse ensaio. Este procedimento depende, efetivamente, do objetivo principal do ensaio pelo que, previamente à análise e processamento dos dados, deve ser claramente definida a natureza do problema.

4.4 Calibração das antenas

Depois de introduzidos todos estes parâmetros referidos anteriormente, o operador deve proceder à calibração das antenas, de modo a garantir a fiabilidade das medições. Na verdade, existem diversos procedimentos de calibração, daí a escolha dos métodos depende de alguns fatores, como por exemplo, o tipo de antenas utilizado no ensaio, os objetivos da própria investigação e as condicionantes físicas da estrutura.

Deste modo, para as antenas de contacto, o processo de calibração mais frequente é o das Antenas Múltiplas na Superfície, uma vez que permite a recolha dos dados em contínuo. Para antenas suspensas, o mais eficiente é o de Estimação da Amplitude ou Teste de Placa Metálica (Figura 4.8 (a)). Diversos autores aconselham recolher os ficheiros de calibração por este método antes do ensaio e sempre que o sistema seja desligado ou se altera a altura a que se encontram as antenas.

Ainda relativamente às antenas de contacto, é importante referir que se aconselha a realização de um Teste de Elevação da Antena (Figura 4.8 (c)) de forma a garantir que a reflexão da superfície surja na imagem obtida pelo radar. Este procedimento permitirá ainda contornar as oscilações indesejáveis verificadas na camada mais superficial (fenómeno habitualmente designado por *ringing*) que faz com que a qualidade da informação nessa zona seja fraca e permitirá também identificar claramente a posição da superfície [3].

É ainda de referir que é usual fazer-se a calibração da altura da antena em relação à superfície, pois durante o ensaio, o veículo ao qual o equipamento está acoplado sofre vibrações/oscilações e estas irão alterar ligeiramente a altura da antena. Assim sendo, durante a calibração do equipamento recorrendo a uma placa metálica, simula-se uma oscilação das antenas (Teste de Balanceamento ou Oscilação), representado na Figura 4.8 (b).

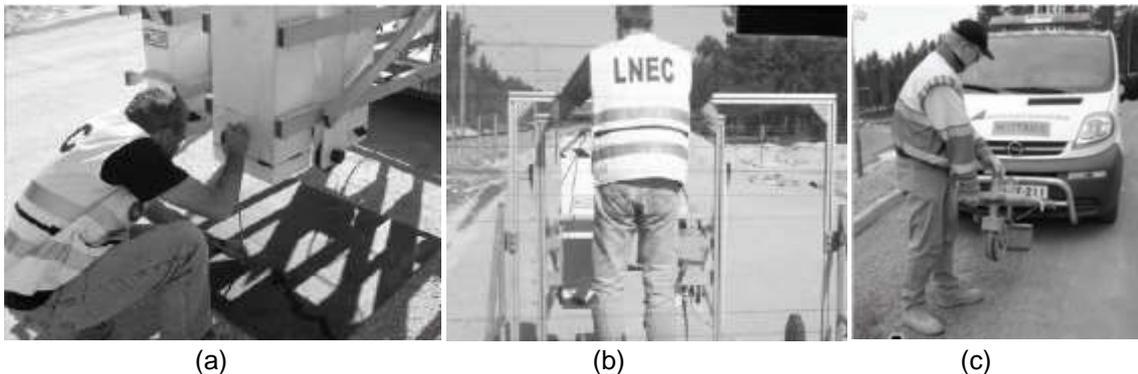


Figura 4.8 Testes típicos de calibração das antenas: (a) Teste de placa metálica; (b) Teste de oscilação; (c) Teste de elevação da antena [3] [19]

De salientar que embora se admita o ar como um “meio transparente”, na verdade ele provoca alterações muito ligeiras ao sinal. Assim, com o intuito de eliminar este efeito, deve ser recolhido o “sinal aéreo”; para tal, inverte-se a posição da antena, captando um sinal sem reflexões [19].

4.5 Vantagens e limitações

A aplicação do radar de prospecção pretende contribuir, no âmbito deste trabalho, para o desenvolvimento de processos de caracterização das camadas de apoio da via-férrea, particularmente no que diz respeito à determinação da espessura e das suas características. De seguida, salientam-se as vantagens associadas à prática de utilização deste equipamento.

É um sistema, que além de permitir traçar um perfil contínuo do local que é objeto de estudo, é um método relativamente rápido de implementar, pela portabilidade e pela possibilidade de realizar medições a velocidades elevadas [3]. Efetivamente, estas duas características fazem do radar uma técnica vantajosa na investigação de infraestruturas de transporte, não só pela qualidade dos resultados, como também pelo facto de dispensar o corte temporário da via ao tráfego, o que se traduz numa redução considerável dos custos totais do ensaio.

De forma a sistematizar as principais vantagens, destacam-se as seguintes características inerentes à utilização deste equipamento [2] [4]:

- Permite caracterizar a subsuperfície desde poucos centímetros a dezenas de metros, dependendo da frequência das antenas;
- Fornece perfis contínuos de alta resolução;
- Permite obter resultados em tempo real;
- Boa repetibilidade, sendo possível uma avaliação de qualidade dos dados durante o processo de aquisição;
- Precisão na localização de defeitos ou objetos enterrados;
- Rapidez na execução dos levantamentos (permite velocidades superiores a 120km/h);
- Levantamentos não destrutivos;
- Não afeta a disponibilidade da infraestrutura;
- Baixo custo.

No que às limitações do radar de prospecção diz respeito, pode-se constatar que é um método particularmente não intuitivo. De facto, é necessário um grande nível de conhecimento para usar este tipo de *software* especializado de forma a permitir uma correta análise e interpretação dos resultados.

Segundo Saarenketo essa é a sua principal limitação, em que se prende com a dificuldade na interpretação dos perfis [19]. Embora a localização de singularidades no perfil não seja um problema, estas poderão ser causadas por diversos fatores, pelo que a experiência e bom senso do operador são determinantes para a credibilidade dos resultados.

Em termos de equipamento as suas limitações também são óbvias, ao se verificar que materiais de alta condutividade conseguem anular quase inteiramente a viabilidade e resolução do scan. Há que também ter em consideração que o sinal ao encontrar condições heterogéneas (por exemplo, solos rochosos) tende a fracionar-se, ficando assim o desempenho do GPR comprometido [31].

Deve-se ainda chamar a atenção que existem algumas limitações no que diz respeito às condições do próprio ensaio, significando isto que a realização de um ensaio com o GPR é possível em qualquer altura do ano, exceto durante ou imediatamente após períodos de chuva [28]. A presença de água livre à superfície provoca perdas consideráveis de energia (absorção elevada), inviabilizando a posterior interpretação dos resultados. Assim, deve-se 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 [3]. A justificação para tal acontecimento deve-se ao valor dielétrico de cada material, no caso do gelo este toma o valor aproximadamente de 3, o que equivale a uma atenuação reduzida no sinal, substancialmente diferente do valor definido para a água (consultar Anexo I).

Existem ainda outras dificuldades associadas ao uso do GPR, das quais se destacam [19]: i) a inexistência de especificações quanto à recolha, processamento e interpretação dos dados; ii) a falta de técnicos com experiência no manuseio do equipamento e na interpretação dos resultados; e por fim iii) a pouca experiência acumulada no meio técnico. Por último, importa ainda salientar que o facto de ter um gasto alto de energia, vistorias prolongadas em terreno podem tornar-se difíceis [31].

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 eletromagnéticas dos materiais. Estas, associadas à dificuldade de automatização do processo, têm contribuído para o lento desenvolvimento da implementação do radar de prospecção [2].

4.6 Interpretação de dados

Para análise e tratamento de dados com o equipamento do radar existe atualmente uma grande diversidade de programas informáticos que facilitam a sua interpretação. Para o presente trabalho recorreu-se então a um desses programas com o fim de avaliar a sua potencialidade e possível aplicabilidade em infraestruturas ferroviárias.

Na verdade, este programa tem vindo a ser utilizado recorrentemente para uma análise no domínio do tempo, em que se avalia a espessura das diferentes camadas e os correspondentes valores da constante dielétrica. Contudo, a avaliação da condição dessas camadas, mais especificamente, o seu nível de degradação e o seu teor em água não têm sido objeto de estudo; tornando-se o foco principal para este trabalho.

Apresentam-se de seguida algumas possíveis funcionalidades do programa em questão e um exemplo de uma imagem de visualização:

- Visualização simultânea de múltiplos conjuntos de dados;
- Interpretação e análise dos ficheiros;
- Sistema de vídeo digital;
- Mapeamento digital;
- Base de dados com informações ferroviárias;
- Dados com informação das condições da medição.

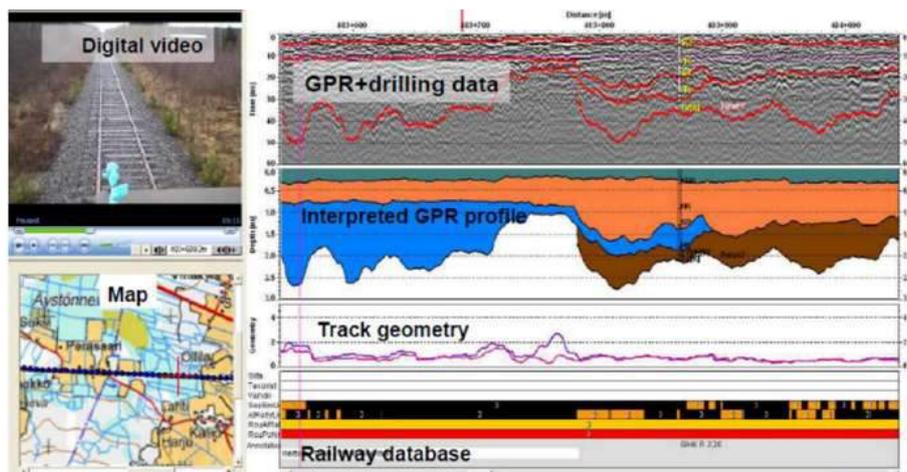


Figura 4.9 Exemplo de uma janela de visualização de um programa comercial [5]

Deste modo, posteriormente ao levantamento dos dados, estes serão editados e analisados recorrendo ao programa especificado. Em primeira instância, é de destacar alguns procedimentos que se devem ter em conta durante o processamento dos dados, por forma a garantir não só uma melhor visualização dos mesmos como também permite selecionar as possíveis camadas de interesse, com o mínimo de interferências associadas.

✓ Seleção de uma escala de cores

O processamento dos registos obtidos envolve várias técnicas de melhoramento de sinais, incluindo a conversão desses registos de sinais em imagens coloridas por aplicação de uma escala de cores apropriada [2]. Deste modo, as imagens resultantes apresentam uma razão sinal/ruído significativamente melhorada, tornando normalmente mais fácil a tarefa de interpretação das secções em análise.

De referir que a imagem criada pela unidade de armazenamento e visualização é uma conversão das amplitudes de reflexão (Figura 4.10 (a)) para uma escala a cores ou tons de cinzento (Figura 4.10 (b)). Este procedimento permite ao utilizador “compactar” os resultados e facilitar a sua interpretação.

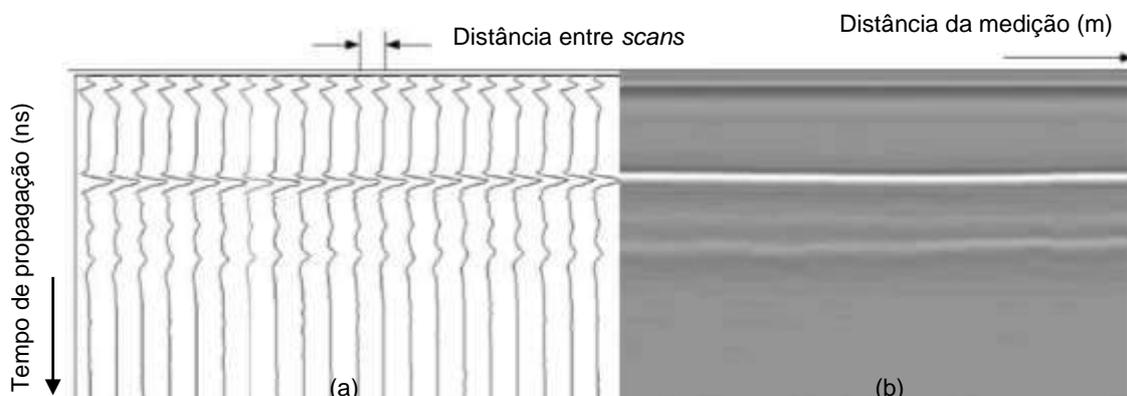


Figura 4.10 Séries de dados GPR, perfil resultante (a) e imagem obtida após seleção de uma escala em tons de cinzento (b) [40]

Por norma, as cores principais que se destacam nos registos são então o preto e o branco, referente às amplitudes máximas positivas e mínimas negativas, respetivamente. Nesse sentido, as amplitudes próximas do nível zero são representadas por tons de cinzento. A escolha desta escala de cores conduz a que nas imagens dos registos se salientem as amplitudes mais fortes relativamente às de mais baixa amplitude.

✓ **Ajuste da Janela de visualização (em ns)**

Nesta fase de processamento, é importante selecionar uma janela de amostragem que englobe os nano segundos de interesse, garantindo que a informação que procuramos fica nela contida.

Para as antenas suspensas, recomenda-se que a onda direta que vai do transmissor para o recetor, seja recolhida/coletada, uma vez que este impulso será utilizado como referência durante o processamento dos dados.

No caso de antenas de contacto, deve-se assegurar que a reflexão da superfície fica abrangida na janela de visualização. É possível verificar-se esse fenómeno fazendo o Teste de Elevação da antena (ver Figura 4.8 (c)), recomendado para cada sessão de ensaio – método descrito em 4.2. Devido ao acoplamento, é extremamente difícil definir-se corretamente a reflexão correspondente à superfície, assim este teste fornece uma boa solução para esse problema.

✓ **Seleção da posição do nível “zero”**

Este parâmetro corresponde à definição da posição de um “tempo zero” ou “*zero level*”, como é habitualmente designado na literatura da especialidade, que tem como objetivo omitir informação indesejada que poderá afetar posteriormente os resultados.

Definir a posição “zero” com precisão em campo é, de facto, uma tarefa bastante difícil. Por esse motivo, a maioria dos operadores tende a escolher um local relativamente estável e de fácil identificação; por exemplo, selecionando o primeiro “pico” positivo ou negativo de uma onda direta e mais tarde corrigi-lo, se necessário.

Deste modo, percebe-se facilmente que este parâmetro não corresponde a um valor fixo (constante), mas deve ser determinado para cada caso de estudo e para cada tipo de antena utilizado [32]. Quando se recorre a antenas suspensas, o sinal gerado devido à camada de ar deve ser removido, enquanto para as antenas acopladas ao solo, o sinal gerado devido à acoplagem é que deve ser desprezado, tentando assim fazer-se coincidir a posição do “zero” com a superfície da infraestrutura a ser analisada. Alguns especialistas, para facilitar a sua identificação, recomendam a utilização de uma placa metálica à superfície, visto que o seu sinal é rapidamente identificável na amostra.

Na figura seguinte, encontram-se representadas as diferentes posições admissíveis para este parâmetro, propostas por utilizadores do GPR numa pesquisa realizada pela “Georadar Research” [32].

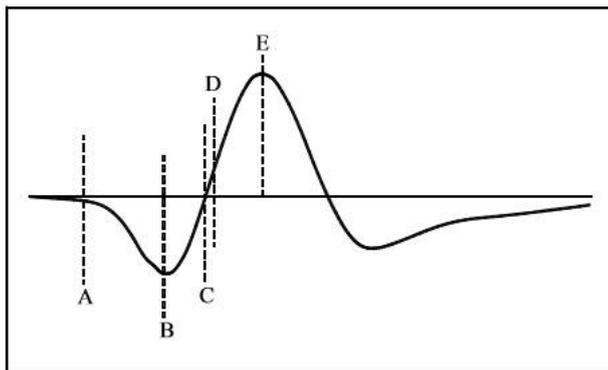


Figura 4.11 Diferentes posições do nível "zero" propostas por utilizadores do radar de prospecção [32]

É perceptível que sua seleção depende, inevitavelmente, do utilizador em causa e dos seus procedimentos aquando da interpretação. Resumidamente, a definição deste parâmetro tem por base um destes cinco métodos [32]: ou a adoção da primeira posição de “pausa” (método A), ou a seleção do primeiro “pico” negativo (método B), ou a posição representada com amplitude zero (método C), ou a definição de um ponto com amplitude média (método D) ou, por último, optando-se pela seleção do primeiro “pico” positivo (método E).

Como já foi referido, existe uma certa tendência em escolher o “zero” através de pontos com amplitude máxima (representados pelos “picos” B e E na Figura 4.11), por ser a forma de interpretação mais precisa. Contudo, é preciso realçar que o intérprete deve atender a possíveis mudanças de polaridade no sinal, o que muitas vezes poderá induzir em erro.

De referir que caso se opte por escolher a posição definida pela amplitude nula após o primeiro “pico” de reflexão, embora seja uma técnica que previna as dificuldades causadas pelas mudanças de polaridade, tende a fornecer informações erradas [3]. Pela experiência demonstrada, o método mostrou ser mais adequado para antenas de frequência média/baixa (entre 25 e 500 MHz) e menos aplicável em antenas de alta frequência (entre 1 e 2 GHz) [32].

✓ Aplicação de filtros horizontais (HFH e HFL)

Em primeira instância, é importante explicar a diferença entre estes filtros explicitados nesta secção com os referidos anteriormente (em 4.2), de modo a evitar-se confundi-los. Durante a preparação do ensaio é recomendado pelos fabricantes a definição de filtros que otimizem a recolha de dados (tem a ver com o próprio equipamento); enquanto os filtros que serão abordados de seguida pretendem, numa fase de processamento, ajudar a reduzir a interferência provocada pelos carris metálicos e travessas.

De acordo com os especialistas do programa de análise utilizado neste trabalho, é recomendado para a avaliação da contaminação do balastro e do teor em água a seleção dos seguintes filtros: HFL - *Horizontal Low Pass Filtering* e HFH - *Horizontal High Pass Filtering (Background removal)*.

Segundo o que foi possível indagar, a aplicação do filtro HFH pretende remover a desordem proveniente dos carris, enquanto o filtro HFL tem como finalidade remover a influência das travessas.

Contudo, é de realçar que em infraestruturas de transporte deve-se ter bastante cuidado ao aplicar filtros do tipo “background removal”, principalmente em ensaios em que se pretende medir a espessura das camadas da infraestrutura a analisar. Este filtro tem como finalidade eliminar um ruído que seja coerente ao longo da linha, isto é, que se espera encontrar ao longo de todo o ensaio, como acontece por exemplo nas reflexões que seguem uma trajetória imprevista, conhecidas habitualmente como “múltiplos”.

Estes ruídos correspondem então a reflexões que reverberam no meio onde estão a propagar-se, não correspondendo a novas interfaces (ver imagem em anexo) [3]. Tal fenómeno justifica-se pelo facto de o programa assumir, por vezes, que as reflexões constantes ao longo de um perfil com aquelas características correspondem a um desses ruídos, o que não é verdade, fazendo desaparecer interfaces das camadas que são imprescindíveis para uma correta análise e interpretação.

Por forma a facilitar a compreensão do efeito da aplicação deste tipo de filtro na melhoria da qualidade dos dados, atente-se na seguinte figura.

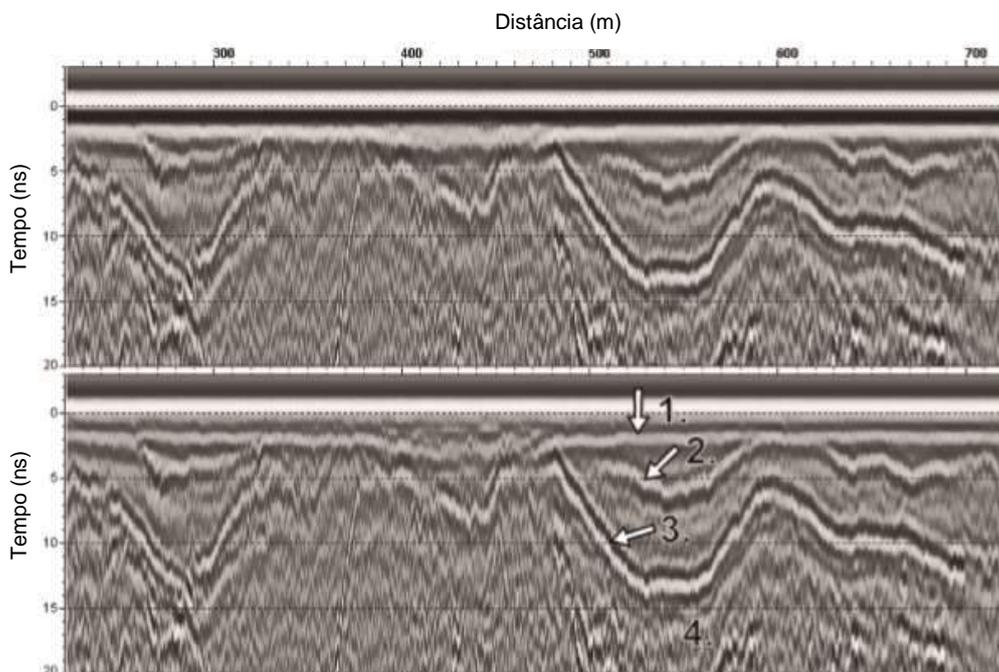


Figura 4.12 Exemplo de um radargrama de origem (em cima) e do mesmo registo após a aplicação do filtro do tipo “background removal” (em baixo), ambos para uma antena de 400 MHz [19]

Os radargramas apresentados mostram então os dados obtidos “em bruto” (em cima) e os mesmos dados após a aplicação do filtro do tipo “background removal” (em baixo).

Verifica-se assim que a reflexão do fundo do pavimento, representado pelo número 1 na figura, é facilmente visível nos dados com o filtro aplicado, o que não acontece para os dados obtidos antes da sua utilização.

A figura também ilustra como a polaridade das reflexões fornece informações sobre as propriedades dielétricas (e do teor em água) das estruturas de transporte. Os refletores positivos, representados a branco entre duas “linhas” pretas (conforme representado em 1 e 2), revelam que o valor dielétrico da camada abaixo desse refletor é mais elevado que o valor dielétrico da camada acima; por outras palavras, isto significa que a camada entre 2 e 3 apresenta uma constante dielétrica superior à camada entre 1 e 2. Contrariamente, a reflexão representada em 3 tem uma polaridade negativa (apresenta uma cor preta no meio de duas “linhas” brancas), isto mostra que a camada 4 tem um valor dielétrico e um teor em água inferiores à camada de cima (entre 2 e 3) [19].

Assim, é de extrema importância o cuidado que se deve ter na aplicação deste tipo de filtros pois podem facilmente conduzir em erro. Acrescentando ainda o facto de que se deve estar consciente de que é impossível filtrar completamente as partes indesejadas da subestrutura e deixar as partes “úteis” (importantes) intactas.

A partir desta altura, o operador deve ter em atenção a polaridade e a cor do sinal, visto que estes seguem uma determinada convenção. Mais à frente, na fase de interpretação, esta convenção permitirá ao intérprete ler e analisar corretamente (e mais facilmente) os resultados. Num sinal obtido com o radar, o “pico” máximo de reflexão é positivo e, geralmente, uma reflexão só é considerada válida se tiver um “pico” positivo e outro negativo [3].

4.7 Considerações finais

No capítulo anterior explicitaram-se os conceitos gerais inerentes ao equipamento do radar, enquanto neste capítulo se pretende evidenciar a aplicação do método nas infraestruturas ferroviárias. Deste modo, foram então abordados os procedimentos de preparação e condução do ensaio na via-férrea, visto existir uma diversidade de parâmetros que têm que ser definidos antes de se proceder ao levantamento dos dados e que poderão influenciar os mesmos. De seguida, salientaram-se ainda as vantagens e limitações associadas ao radar.

Uma contribuição importante deste capítulo foi a de esquematizar os procedimentos a ter em conta aquando da interpretação dos dados, parâmetros que são fundamentais e servirão de base para a análise efetuada. Salientaram-se ainda os problemas associados a aplicação de filtros que poderão levar a interpretações erradas, quando aplicados na avaliação de infraestruturas de transporte. Pretende-se assim ganhar noções da adequabilidade do método, aprofundar os conhecimentos relativos a esta técnica e facilitar a compreensão do trabalho desenvolvido.

Capítulo 5

5. ANÁLISE DA CONDIÇÃO DO BALASTRO COM RECURSO A FERRAMENTAS DISPONÍVEIS

5.1 Enquadramento

Este capítulo é dedicado particularmente à apresentação dos casos de estudos, abordando desde a aquisição e tratamento de dados e fazendo-se posteriormente uma análise no domínio do tempo, tal como é usualmente considerado. Por fim, interpretaram-se os resultados daí obtidos.

Para tal, recorreu-se a diferentes ferramentas computacionais que permitiram avaliar várias características da via. Foram, deste modo, alvo de estudo dados recolhidos tanto em laboratório como em campo, com o recurso a antenas com diferentes frequências.

De salientar que os dados laboratoriais já tinham sido analisados para outras avaliações aquando da realização dos ensaios. Contudo, a análise no domínio do tempo para averiguar a qualidade do material ainda não tinha sido explorada. As condições detalhadas dessas medições encontram-se descritas nos documentos [16] [5] [33], onde vem discriminado não só todo o trabalho de laboratório envolvido como também os resultados obtidos nessas mesmas avaliações.

Neste capítulo, faz-se então uma abordagem para a avaliação das características do material da via-férrea, recorrendo a um programa comercial de interpretação, considerando os dados recolhidos pelas diferentes vias, enquanto a análise com o recurso a um programa de cálculo automático, desenvolvido no âmbito deste trabalho, será apresentada só no capítulo seguinte.

5.2 Características das antenas utilizadas

Conforme foi referido, foram analisadas amostras medidas tanto em laboratório como em campo, com o recurso a dois tipos de sistema de radar, designadamente: um de fabricação Italiana IDS-Radar (*Ingegneria Dei Sistemi*) com frequência de 400 MHz e outro de fabricação Americana GSSI (*Geophysical Survey Systems Inc.*) com 1000 MHz de frequência; tendo o cuidado e a atenção das especificidades de cada um.

Embora se considere que o primeiro sistema de antenas utilizado seja caracterizado por ser um equipamento acoplado à superfície ensaiada, na verdade, este consegue recolher informações a uma altura (embora reduzida) do solo; tendo sido essa a metodologia adotada durante os ensaios com este sistema GPR, considerando-se uma elevação da antena de cerca de 30cm [33]. Relativamente ao segundo sistema de aquisição de dados, este é colocado a uma altura específica em relação à superfície, tendo-se adotado uma distância de 50cm [16].

Contudo, é importante referir que, embora as medições com estas antenas tenham sido feitas longitudinalmente em relação à linha em estudo aquando da recolha dos dados, a sua orientação e posição não foi a mesma nos dois equipamentos de ensaio. Para o sistema da IDS consideraram-se sentidos diferentes nas antenas de transmissão e receção e estas foram posicionadas perpendicularmente em relação à via, o que não aconteceu no caso das antenas da GSSI, em que foram posicionadas longitudinalmente em relação à linha em estudo e com a mesma orientação em ambas as antenas, atente-se na seguinte figura.

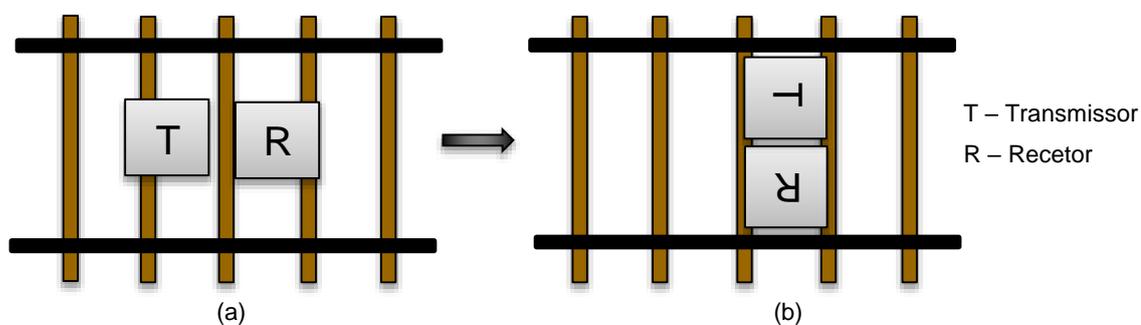


Figura 5.1 Exemplificação da posição das antenas: (a) transmissão direta (GSSI) e (b) transmissão invertida (IDS)

Observando-se a Figura 5.1 (b), que corresponde ao procedimento adotado para as antenas da IDS, verifica-se facilmente que existe uma rotação de 90° de uma antena em relação à outra, método usualmente designado por transmissão invertida. Contrariamente a este sistema, as antenas da GSSI foram posicionadas com o mesmo sentido, tal como está representado à esquerda na mesma figura, caracterizado como transmissão direta. O objetivo da técnica de transmissão inversa é a de limitar (ou até mesmo eliminar) a influência de alguns componentes, como por exemplo, as travessas. De salientar que diversos esforços são feitos na tentativa de

eliminar eficazmente, ou pelo menos reduzir ao máximo, o ruído proveniente desses materiais, principalmente dos carris e das travessas.

Tendo em conta o que foi referido no capítulo 4, importa destacar as principais características inerentes a estas antenas. Sabe-se que o sistema de antenas IDS utilizado, uma vez que contém uma frequência mais baixa, consegue atingir profundidades maiores (profundidade máxima de penetração na ordem dos 2,5m) embora com uma resolução menor. Para o sistema GSSI, as antenas utilizadas são de uma frequência relativamente elevada, com a finalidade de obter reflexões com elevada resolução ainda que até uma profundidade mais reduzida (da ordem dos 0,80 m). Não esquecendo que a profundidade máxima de penetração e resolução obtidas são, obviamente, em função do material percorrido.

5.3 Dados utilizados na análise

5.3.1 Medições com o sistema da IDS (400 MHz)

Em laboratório

No sentido de estabelecer um primeiro contacto com o programa e a fim de avaliar a sua potencialidade, começou-se por comparar alguns parâmetros já conhecidos *a priori*, provenientes de ensaios de laboratório já realizados [5][16], com os resultados obtidos por este *software*.

Para tal, foram seleccionadas amostras com diversos índices de contaminação e para cada um desses índices analisaram-se diferentes teores em água, respetivamente:

- Índices de contaminação (IC): 6, 15, 35 e 55
- Teor em água (%): 6, 8, 10 e 12

Apresentam-se, de seguida, alguns aspetos que se consideram essenciais para a compreensão do que foi feito no âmbito desta dissertação. Assim sendo, encontram-se representados na Tabela 5.1 os diferentes valores das constantes dielétricas obtidos em laboratório.

Tabela 5.1 Diferentes valores das constantes dielétricas obtidos para cada índice de contaminação e correspondente teor em água, considerando a antena de 400 MHz suspensa [16]

		<i>Teores em água</i>			
		6%	8%	10%	12%
Amostras	6	4,91	5,09	5,10	5,25
	15	5,46	6,05	6,34	6,13
	35	7,09	7,81	8,25	8,56
	55	7,41	7,95	9,10	9,49

Estes valores foram adquiridos com o recurso a uma antena IDS suspensa (cerca de 30 cm), no sentido de simular as leituras recolhidas pela VIV EM 120 atualmente utilizada em Portugal.

Importa ainda referir que o modelo utilizado constou de uma caixa de madeira com uma área de cerca de $0,40 m^2$, no fundo da qual se colocaram folhas de alumínio com o objetivo de simular um refletor ideal [16]. A construção do modelo físico de cada índice de contaminação foi feita com o teor em água mais baixo (6%), juntando-se de seguida a mistura de solo-água, confeccionada separadamente, ao balastro. O solo funcionou então como o material contaminante e para a obtenção do teor em água imediatamente a seguir recorreu-se à adição de água em quantidade correspondente a cada incremento, simulando-se assim os quatro teores pretendidos (6%, 8%, 10% e 12%). Nesse sentido, foram feitos os levantamentos dos dados do GPR para os diferentes modelos, em que para cada um desses modelos optou-se por fazer duas medições, uma logo após a colocação da água e outra ao fim de 2h da adição.

A amostra final obtida tinha uma altura de cerca de 30cm, embora este valor se tenha alterado nos últimos índices, constatando-se para o índice 55 uma altura de 35,7cm devendo-se ao aumento do volume por parte das partículas do solo [16]. É ainda de realçar que para cada um desses ensaios foram realizadas três medições diferentes, no sentido de se obter uma deteção melhor da posição da superfície e/ou da base do modelo.

Primeiramente, começou-se por colocar uma placa metálica de grandes dimensões à superfície com o propósito de se localizar mais facilmente essa reflexão, uma vez que o metal representa um “refletor ideal”, amplificando a onda nele refletida e facilitando assim a visualização do sinal. Este procedimento é bastante comum para a calibração deste tipo de antenas (suspensas), como já foi referido anteriormente. Na segunda medição, recorreu-se a uma placa metálica com menores dimensões, de modo a registar simultaneamente ambas as reflexões (tanto a da superfície como a do fundo da amostra). Para a terceira medição, não foi utilizada nenhuma placa metálica, de forma a reflexão do fundo da amostra estar mais visível.

Contudo, tendo em conta o interesse do presente trabalho, apenas foi tida em consideração para análise a última medição destas três referidas anteriormente, ou seja, sem a presença da placa metálica. A escolha destes ficheiros deve-se ao facto de, deste modo, se considerar os ficheiros mais “limpos” e aproximar o procedimento de ensaio utilizado *in situ*. Porém, para facilitar a definição do nível “zero” com estas antenas, teve-se em conta uma das amostras com a placa metálica de grandes dimensões à superfície, somente para essa situação.

In situ

De seguida, com a informação recolhida anteriormente e sabendo as capacidades inerentes ao programa, foram analisados dados recolhidos em campo para uma posterior interpretação dos mesmos do ponto de vista das características dos materiais.

As áreas que foram alvo de estudo e análise dizem respeito a uma linha que pertence à rede ferroviária nacional, embora por questões de confidencialidade a sua localização detalhada não poderá ser apresentada. Por esse motivo, as áreas serão denominadas ao longo desta dissertação como “A”, “B”, “C”, “D” e “E”.

Da informação que pode ser facultada sabe-se que esta linha apresenta alguma heterogeneidade, sendo que a implantação dos seus elementos constituintes ocorreu basicamente em quatro períodos distintos. Observa-se ainda que associado ao mau estado da geometria da via encontram-se outras deficiências que correspondem naturalmente à sua causa, como o estado do carril e da drenagem.

Assim, na Tabela 5.2 encontra-se de forma sintetizada as principais características associadas à linha em estudo, estes levantamentos geofísicos foram executados com o radar próximo da superfície, ainda que suspenso, e recolhidos em intervalos de 0,25m ao longo de cada troço.

Tabela 5.2 Algumas características da infraestrutura analisada com a antena de 400 MHz

<i>Secções</i>	<i>Extensão intervencionada (m)</i>	<i>Tipo de balastro</i>	<i>Tipo de Travessa</i>	<i>Estado da Geometria da Via</i>
<i>A</i>	260	Granítico	Bibloco	Deficiente
<i>B</i>	110	Granítico	Bibloco	Deficiente
<i>C</i>	140	Granítico	Bibloco	Deficiente
<i>D</i>	370	Granítico	Bibloco	Deficiente
<i>E</i>	-	-	Bibloco e Madeira	Mau

De referir ainda que as secções selecionadas para este estudo que foram intervencionadas não apresentavam elementos tais como: aparelhos de mudança de via (AMV), pontes, túneis, passagens de nível (PN), estações, etc.; no sentido de evitar ou atenuar ao máximo a influência destes nos resultados obtidos.

Contudo, a secção E que corresponde a um troço da mesma linha ferroviária em análise, apesar de não ter sido submetida a qualquer tipo de trabalho de manutenção/reabilitação, foi objeto de estudo especialmente pelo facto de apresentar um troço com características muito distintas. Em primeira instância, observa-se que nesse troço existem dois tipos de travessas (travessas bibloco e travessas de madeira) e ainda é composta por um túnel que se apresenta em más condições, nomeadamente no que diz respeito à geometria da via.

Outra nota importante, é que este caso de estudo foi realizado através da análise de ensaios medidos com o radar de prospeção em campanhas regulares levadas a cabo pela Infraestruturas de Portugal S.A., tendo a recolha destes dados ocorrido em duas épocas distintas, com três anos

de diferença. Sabe-se que no levantamento das amostras dos últimos ensaios, que ocorreram em 2015, a camada de balastro era constituída, essencialmente, por material granítico, colocado após intervenções na via. Salienta-se assim que o tipo de balastro descrito na Tabela 5.2 corresponde somente aos dados mais atuais, desconhecendo-se o material existente antes dessas ações de reabilitação da via.

5.3.2 Medições com o sistema da GSSI (1 GHz)

Em laboratório

Da mesma forma que foram analisados os dados laboratoriais recolhidos com o sistema da IDS, para a antena de 1 GHz seguiu-se o mesmo procedimento. As condições de ensaio foram idênticas e foram alvo de estudo as 16 amostras mencionadas anteriormente, no entanto, o posicionamento da antena neste tipo de sistema requer uma distância à superfície do modelo físico da ordem dos 40 a 50 cm. As constantes dielétricas obtidas por esta antena foram as seguintes:

Tabela 5.3 Diferentes valores das constantes dielétricas obtidos para cada índice de contaminação e correspondente teor em água, considerando a antena de 1 GHz [33]

		<i>Teores em água</i>			
		6%	8%	10%	12%
<i>Amostras</i>	6	3,5	3,6	3,7	3,8
	15	4,1	4,2	4,5	4,8
	35	5,0	5,2	5,9	6,2
	55	5,8	6,1	6,9	7,6

In situ

Relativamente às medições efetuadas em campo, estas agora dizem respeito a uma linha existente no Continente Africano e pelos motivos já explicitados as áreas de estudo serão intituladas por “F” e “G”.

Esta linha férrea foi recentemente reativada com vista a possibilitar o transporte de minerais por veículos ferroviários. Constatou-se ainda que se trata de uma via-férrea sem camada de sub-balastro, isto é, em que a camada de balastro assenta diretamente nos solos de fundação, o qual nem sempre exhibe as melhores características geotécnicas ao longo do traçado.

Após a realização dos ensaios com o radar ao longo da linha, foram também executados poços na camada de balastro com o objetivo de medir a espessura desta camada, contribuindo assim para calibrar as velocidades de propagação do sinal nos radargramas obtidos com o equipamento. De seguida, apresentam-se esses mesmos resultados.

Tabela 5.4 Dados relativos à infraestrutura analisada com a antena de 1 GHz

Secções	Tipo de Travessa	Espessura Travessa (cm)	Espessura de Balastro (cm)			Constante dielétrica (ϵ_r)
			Limpo	Contaminado	Total	
F	Monobloco	20	14	0	14	6,5
G	Monobloco	20	15	33	48	12

De salientar que a espessura da camada de balastro variou, em geral, entre 20 e 30 cm. Embora existam exceções em que a espessura de balastro apresentava valores entre 15 e 20 cm e em alguns casos superiores a 30 cm. Estes resultados foram concluídos com base na informação obtida, assim foi possível aferir uma estimativa da espessura de balastro ao longo da linha.

5.3.3 Campanhas de recolha dos dados

Para a aquisição dos dados recolhidos em laboratório, uma vez que estes foram executados sequencialmente e foi-se adicionando água de forma controlada, considerou-se, para os casos de estudo em análise, os dados dos ensaios recolhidos após 2h de se ter colocado a água. Esta metodologia deve-se ao facto de a amostra ao fim daquele tempo já se encontrar mais estabilizada, enquanto aqueles que foram medidos logo após a adição da água, não foram tidos em consideração.

Para os dados medidos em campo, verificou-se que, após algumas inspeções levadas a cabo em 2012, a linha que foi alvo de estudo com a antena de 400 MHz (IDS) apresentava algumas deficiências ao nível da sua plataforma. Com os levantamentos no terreno, foi então possível caracterizar a infraestrutura e assim fazer propostas de intervenção naqueles troços. As ações de reabilitação decorreram entre o período de outubro de 2013 e junho de 2015.

Deste modo, os levantamentos geofísicos considerados para o caso de estudo correspondem a duas épocas distintas, nomeadamente, antes e após as intervenções na via, por forma a avaliar a contaminação do balastro presente em cada período. Assim, para o presente trabalho considerou-se as medições realizadas ao longo do mês março no ano de 2012 e durante o mês setembro de 2015. Salienta-se também o facto da preferência da escolha de campanhas com épocas de pluviosidade distintas, a fim de possibilitar a avaliação da influência do teor em água na plataforma em estudo.

Para a antena de 1 GHz, foram analisados elementos obtidos pelo LNEC durante uma medição realizada com o equipamento GPR em julho de 2014. Salienta-se que neste caso, como foi realizada uma única campanha de ensaios, a análise realizada incidiu na avaliação ao longo da via, baseada na seleção de troços com características distintas, tanto em termos de espessuras

da camada de balastro, como em termos do nível de contaminação dessa camada, designadamente, balastro limpo (secção F) e balastro maioritariamente contaminado (secção G).

5.4 Metodologia adotada

Para uma melhor compreensão da metodologia utilizada nesta análise e tendo em conta a diversidade de parâmetros necessários a ter em consideração (mencionados anteriormente em 4.3 e 4.5), relativos tanto aos procedimentos de preparação e condução do ensaio como ao programa de interpretação utilizado, apresentam-se de seguida os valores adotados para cada grandeza.

Ainda de referir que, de modo a ser efetuada uma análise em pormenor, foi necessário efetuar alguns passos para garantir que a análise ocorria nos mesmos troços. Nesse sentido, primeiramente foi necessário verificar o sentido da medição das campanhas levadas a cabo em anos diferentes e, de seguida, alinhar as campanhas, uma vez que estas não se iniciavam e terminavam exatamente nos mesmos pontos quilométricos (Pks).

5.4.1 Parâmetros adotados previamente à condução do ensaio

Tal como referido, o número de amostras por scan recomendado para os ensaios em infraestruturas de transporte é de 512, tendo sido este o valor considerado em todos os casos de estudo no presente trabalho. Relativamente aos outros parâmetros abordados na secção 4.3, encontram-se definidos na seguinte tabela.

Tabela 5.5 Parâmetros considerados previamente à realização do ensaio

Antenas	Amostras	Janela de amostragem	Filtros FIR		Filtros IIR		Scans /metro
			<i>High-pass</i>	<i>Low-pass</i>	<i>High-pass</i>	<i>Low-pass</i>	
<i>IDS</i>	Laboratório	40 ns	-	-	-	-	-
	<i>In situ</i>	90 ns (2012) 40 ns (2015)	-	-	-	-	8,6
<i>GSSI</i>	Laboratório	20 ns	500 MHz	3000 MHz	100 MHz	1000 MHz	-
	<i>In situ</i>	25 ns	500 MHz	3000 MHz	100 MHz	1000 MHz	9,91

De notar que, os filtros utilizados para o sistema da GSSI estão definidos na Tabela 5.5, no entanto, para o sistema de antenas da IDS esta informação não é facultada pois esses valores

não foram disponibilizados pelo fabricante do equipamento. Mais ainda, neste equipamento de radar (IDS) apenas o fabricante consegue manipular estas configurações de filtragem, o que não acontece no caso das antenas da GSSI.

Ainda de referir que em todos os casos de estudo em análise foram aplicados ganhos uniformes (constantes), uma vez que não se realizaram ensaios com antenas acopladas ao solo, mesmo para os ensaios com as antenas de contacto existiu sempre uma altura mínima durante a medição, como já foi referido.

Outra particularidade da adoção desta metodologia, é o facto de assim não se “danificar” o ficheiro, uma vez que não existem discrepâncias de ganhos ao nível das amplitudes das interfaces; aspeto importante neste trabalho visto se ter feito uma abordagem na qual esta grandeza tem uma importância significativa, como apresentado no capítulo 6.

5.4.2 Parâmetros adotados no processamento do sinal

Antes de mais, a primeira coisa a ser definida aquando do processamento dos dados do GPR é a adoção de uma escala de cores, que neste caso foi considerada a escala em tons de cinzento, o que conduz a que nas imagens dos registos se salientem as reflexões correspondentes às amplitudes mais fortes relativamente às de mais baixa amplitude.

No que diz respeito ao ajuste da janela de visualização, para o sistema IDS utilizado, conforme se viu, durante os ensaios (de laboratório e *in situ*) foi considerada uma distância reduzida até à superfície, apesar de pouco significativa conseguiu-se garantir deste modo que os registos abrangiam tanto a reflexão do ar como a da primeira camada (superfície), facilitando assim a identificação desta.

Posto isto, as janelas de visualização adotadas para cada ensaio e para cada sistema de antenas utilizado corresponderam às seguintes:

Tabela 5.6 Janelas de visualização adotadas em cada caso de estudo

<i>Sistema de antenas</i>	<i>Amostras</i>	<i>Tempo (ns)</i>
<i>IDS</i>	Laboratório	15
	<i>In situ</i> 2012: A, B, C, D, E	15
	<i>In situ</i> 2015 A, B, C, D, E	15
<i>GSSI</i>	Laboratório	15
	<i>In situ</i> (F e G)	10

Quando à definição do nível “zero”, para os casos de estudo em que se recorreu ao sistema de antenas da GSSI, esta posição correspondeu à máxima amplitude de reflexão (positiva) coincidindo com o início da camada de balastro e o topo da travessa – na Figura 4.11 surge identificada como o ponto E. A seleção deste “zero” teve como base a adoção de uma posição facilmente identificável nos ficheiros do GPR de modo a obter-se uma maior coerência ao longo de toda a análise.

Para o sistema de antenas da IDS, a localização deste parâmetro mostrou ser uma dificuldade maior, uma vez que estas antenas não estão completamente assentes na superfície, encontrando-se suspensas efetivamente a uma altura reduzida. Assim, para facilitar este processo, analisou-se uma das amostras (de laboratório) com placa metálica à superfície, pois a reflexão daí obtida é bastante evidente. Observe-se a Figura 5.2 onde se indica a localização precisa da superfície.

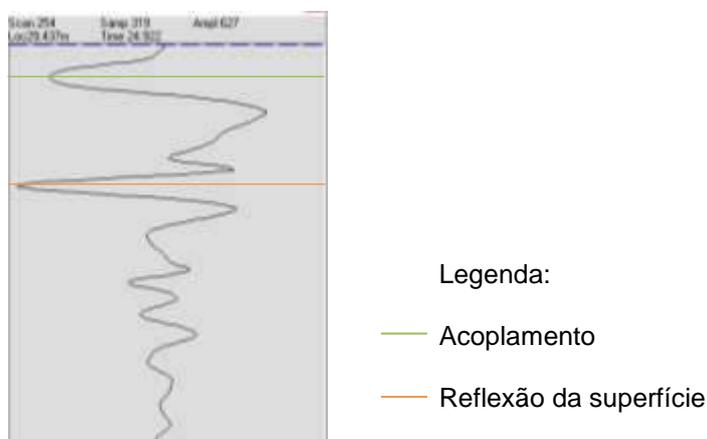


Figura 5.2 Identificação da superfície numa amostra com placa metálica

Com base na visualização anterior foi possível seleccionar-se o “zero” para estas antenas, considerando-se a reflexão logo abaixo da camada de ar, conforme ilustra a Figura 5.3, seguindo-se o mesmo critério para as outras amostras.

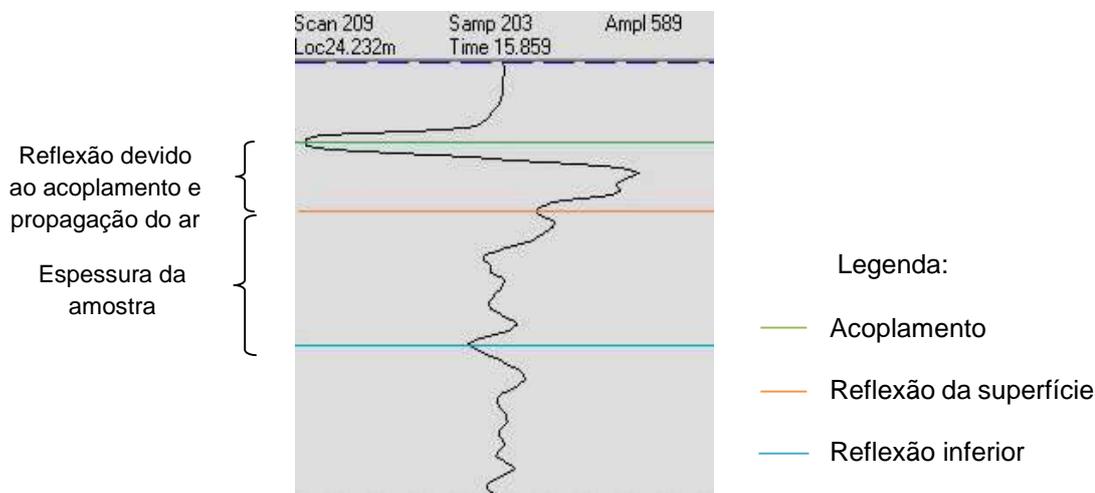


Figura 5.3 Exemplo de identificação das reflexões num ficheiro típico do sistema de antenas IDS

Outro aspeto fulcral deste tipo de antenas e que se deve ter especial atenção refere-se à utilização do programa de interpretação comercial. Ao transferir-se um ficheiro da IDS, este programa, por defeito, acaba sempre por inverter o sinal; fenómeno que se verificou apenas para este tipo de antenas.

Relativamente ao último procedimento a ter em conta, a aplicação dos filtros digitais, considerou-se para os ensaios *in situ* os filtros HFL e HFH em ambos os sistemas de equipamento utilizados; no entanto, para os ensaios laboratoriais tal utilização não faz sentido, pelo que estes filtros não foram considerados nessas amostras. Contudo, considerou-se importante para efeitos de investigação testar a sua aplicação nestes ficheiros, tendo verificado que os resultados daí obtidos foram os mesmos quer na ausência/presença destes filtros.

5.5 Processamento do sinal e Interpretação dos resultados

Os sistemas de radar permitem diferentes modos de operação, sendo essencial adotar técnicas de processamento de sinal e ferramentas de visualização, de forma a possibilitar uma adequada compreensão da informação obtida. De constatar que a fase de processamento e interpretação dos resultados é a mais demorada de todo o ensaio, é nesta fase que a experiência traça a fronteira entre uma boa análise e uma interpretação imprecisa.

Assim, através das leituras recolhidas foi possível obter os seguintes parâmetros sob a forma de perfis: *GPR Ballast Fouling Index (GBFI)* e *Moiture Profile*; em que o primeiro indica o grau de contaminação associado à camada de balastro em estudo enquanto o segundo fornece uma noção do teor em água envolvido. Os resultados poderão observar-se de seguida, para cada tipo de antenas utilizado e respetiva secção. Fez-se ainda a análise da amplitude do sinal, no sentido de comparar esses parâmetros com as amplitudes registadas no domínio do tempo.

5.5.1 Análise do GBFI e do Teor em água

- Medições com o sistema da IDS

Em laboratório

Primeiramente, pretendeu-se confrontar os elementos obtidos a partir dos dados do radar com a informação dos ensaios disponível. Assim sendo, apresentam-se na Figura 5.4, como exemplo, os resultados obtidos para as amostras com índice de contaminação 15 e os respetivos teores em água (6%, 8%, 10% e 12%).

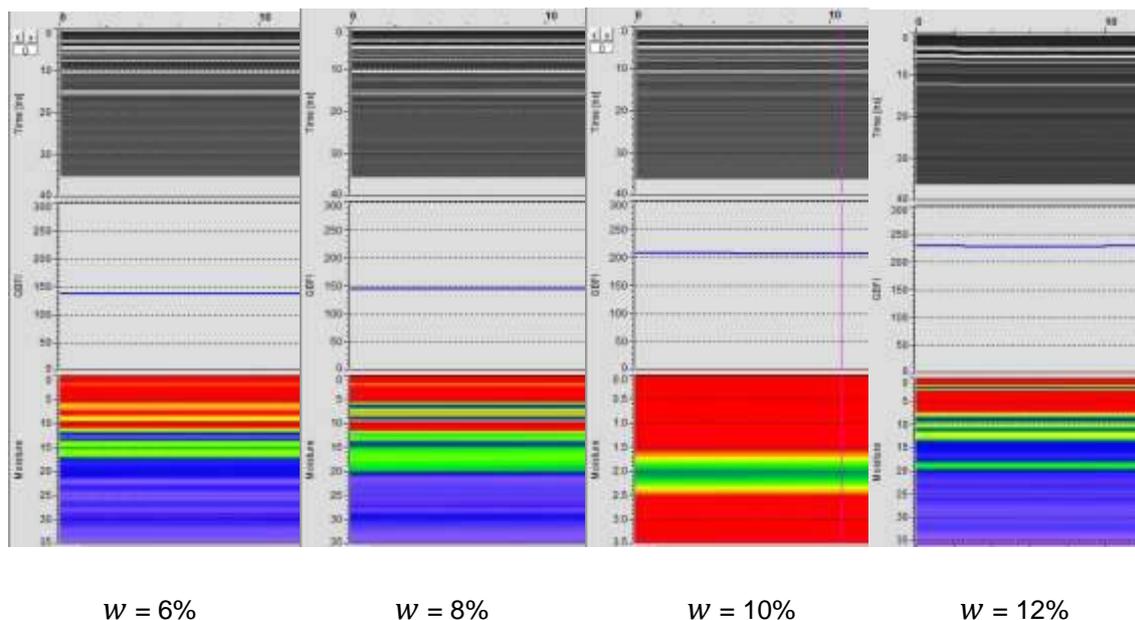


Figura 5.4 Resultados obtidos para as amostras com índice de contaminação 15 e respetivos teores em água

Da observação da figura anterior, verifica-se que o índice de GBFI mantém-se relativamente constante ao longo do ensaio, apresentando níveis um pouco superiores para teores em água mais elevados, justificado pelo facto do grau de contaminação depender fortemente do teor em água presente no meio.

No perfil correspondente ao teor em água, os resultados obtidos não foram esclarecedores, praticamente não se verificou uma diferença significativa ao comparar-se a primeira amostra, com o teor em água mais baixo, com a última amostra em que o teor em água é mais elevado. De ressaltar ainda que os tons a azul/roxo neste perfil representam um teor em água mais baixo enquanto a cor vermelha corresponde a um teor em água elevado. Resumidamente, encontra-se representada na Figura 5.5 a variação do GBFI com os diversos índices de contaminação e respetivos teores em água.

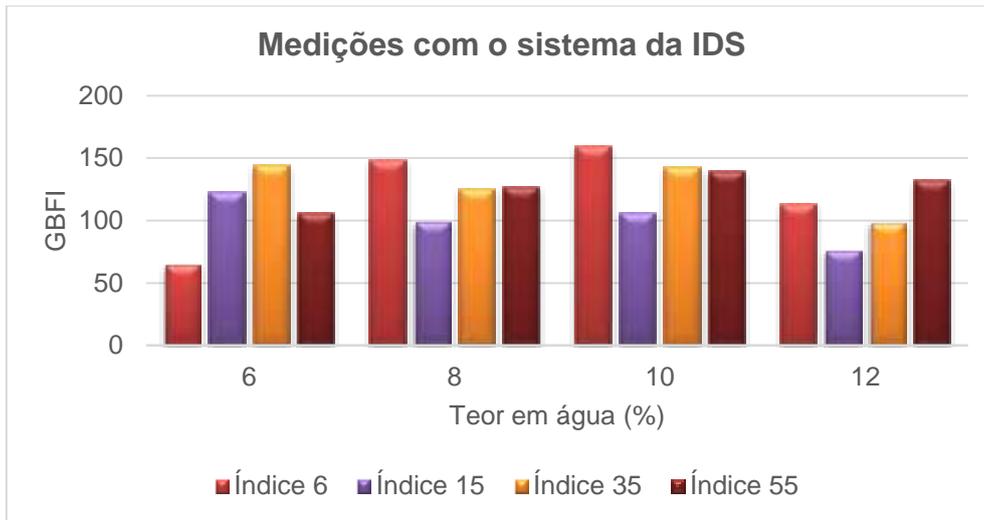
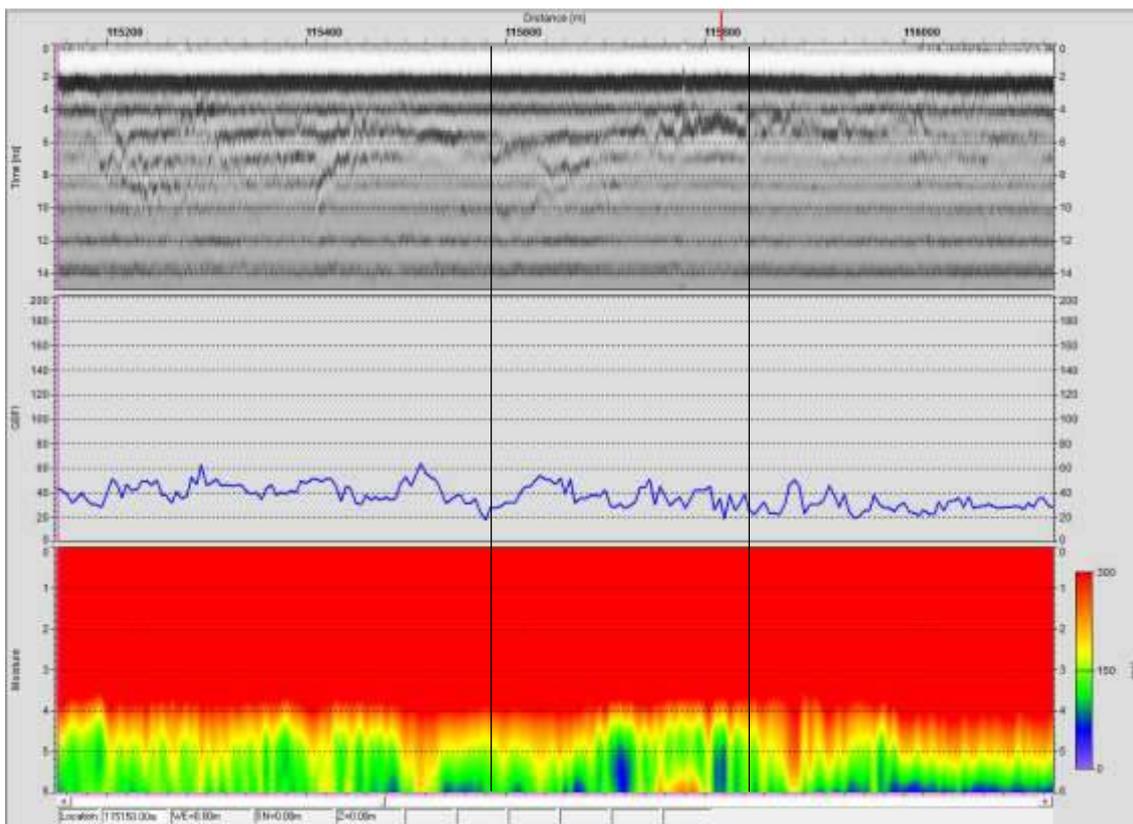


Figura 5.5 Resultados obtidos, para as amostras laboratoriais, do índice de GBFI com a antena de 400 MHz

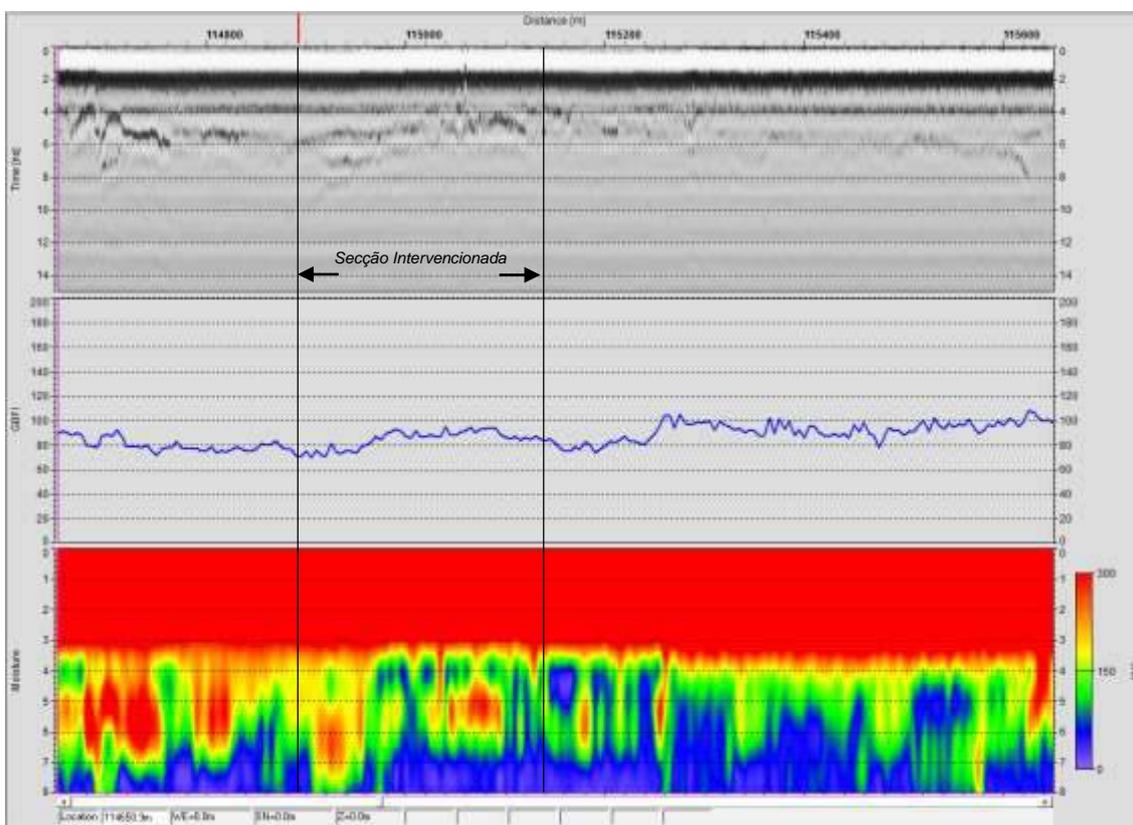
Observando a Figura 5.5, é perceptível que os resultados obtidos por este programa de interpretação não são conclusivos, na medida em que o valor do GBFI, o qual determinada a condição da camada de balastro, varia considerando o mesmo índice de contaminação, o que não é coerente. Para além disso, seria expectável que este índice fosse aumentando com o aumento do teor em água, o que nem sempre se verificou, tendo até em algumas situações diminuído.

In situ

De seguida, apresentam-se os resultados obtidos para as secções A, B, C, D e E. Nos troços que foram intervencionados, representaram-se duas linhas a delimitar cada secção, de modo a facilitar a sua identificação e posteriormente a comparação entre as diferentes campanhas.

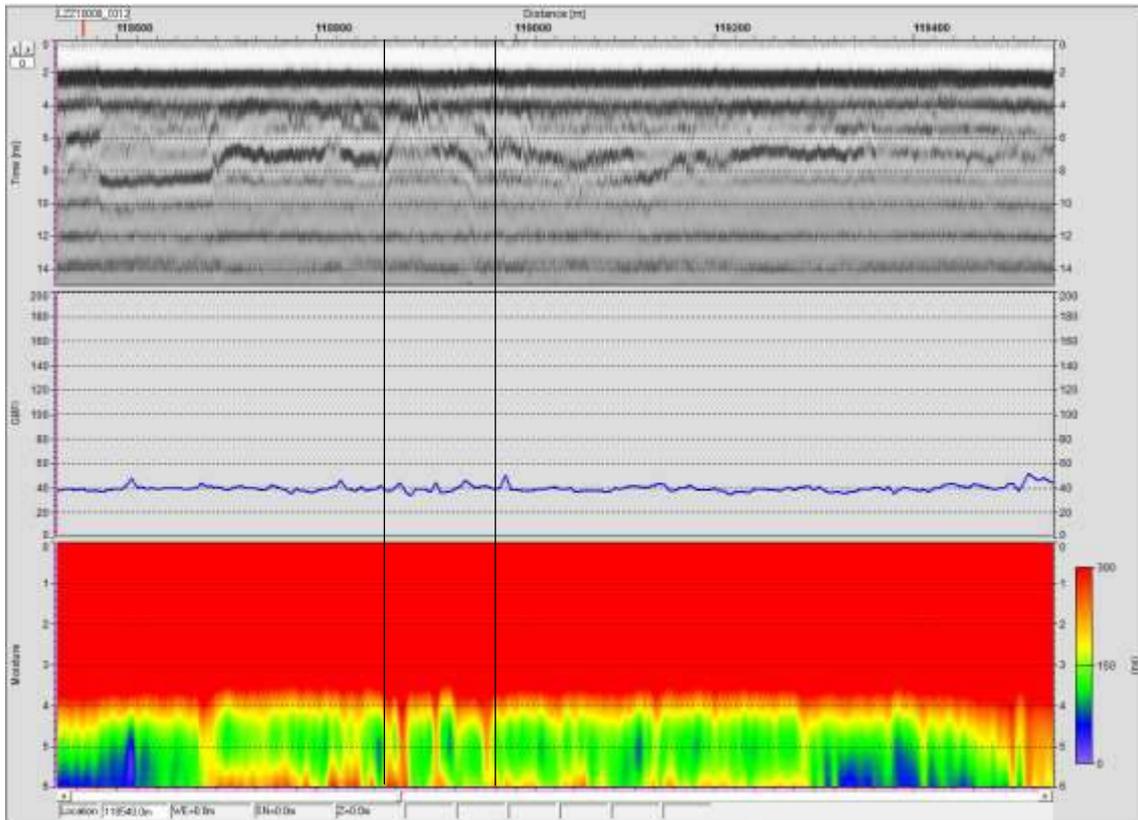


(a)

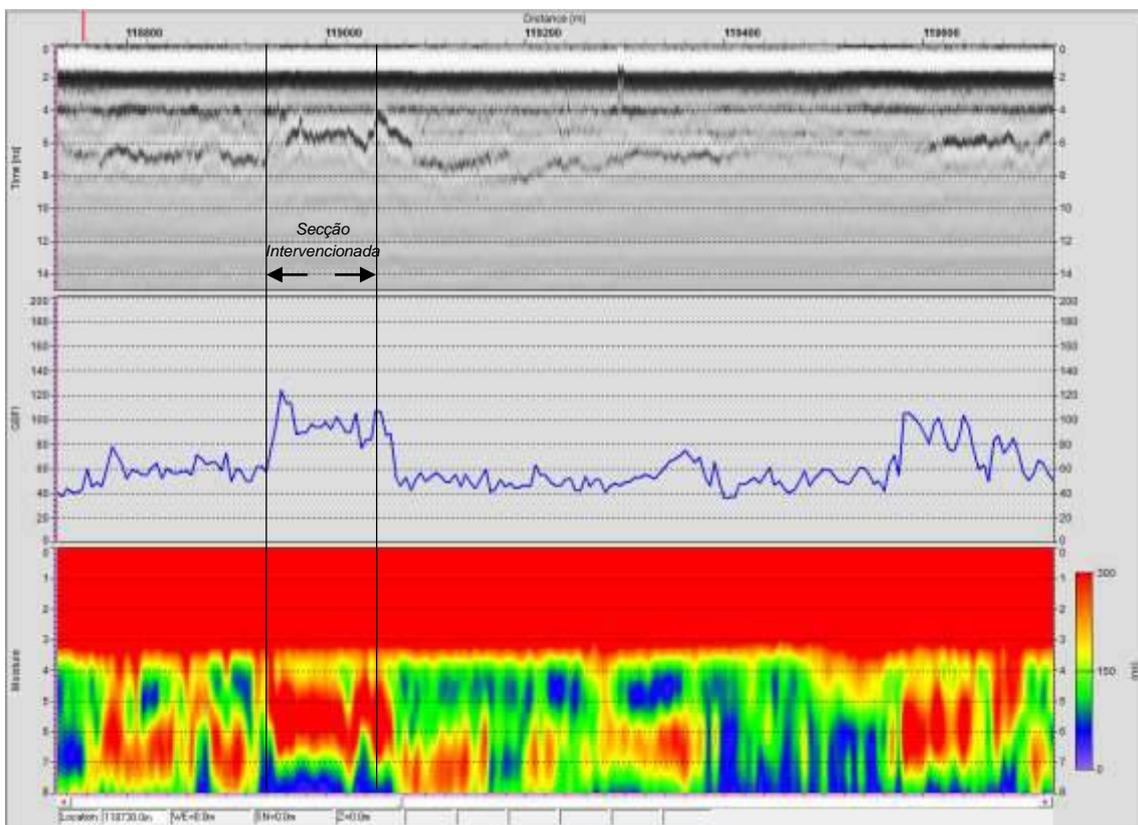


(b)

Figura 5.6 Resultados obtidos para a secção A, em 2012 (a) e em 2015 (b)

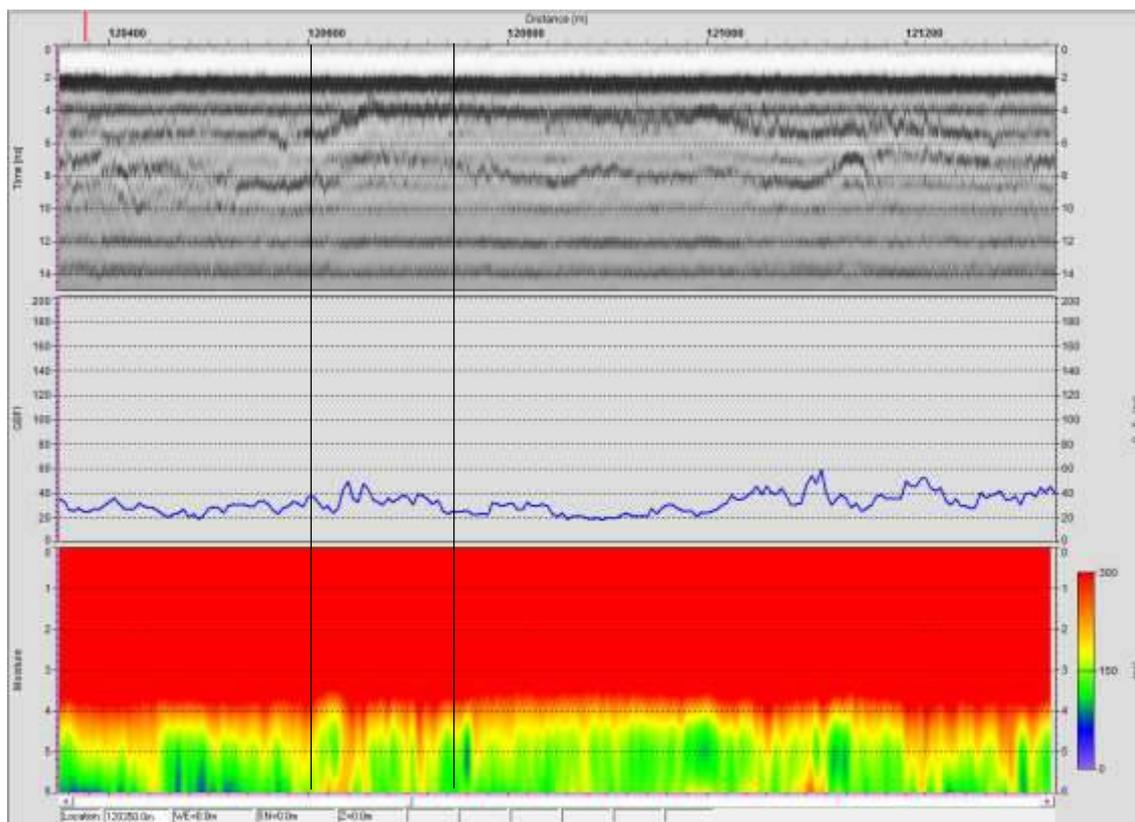


(a)

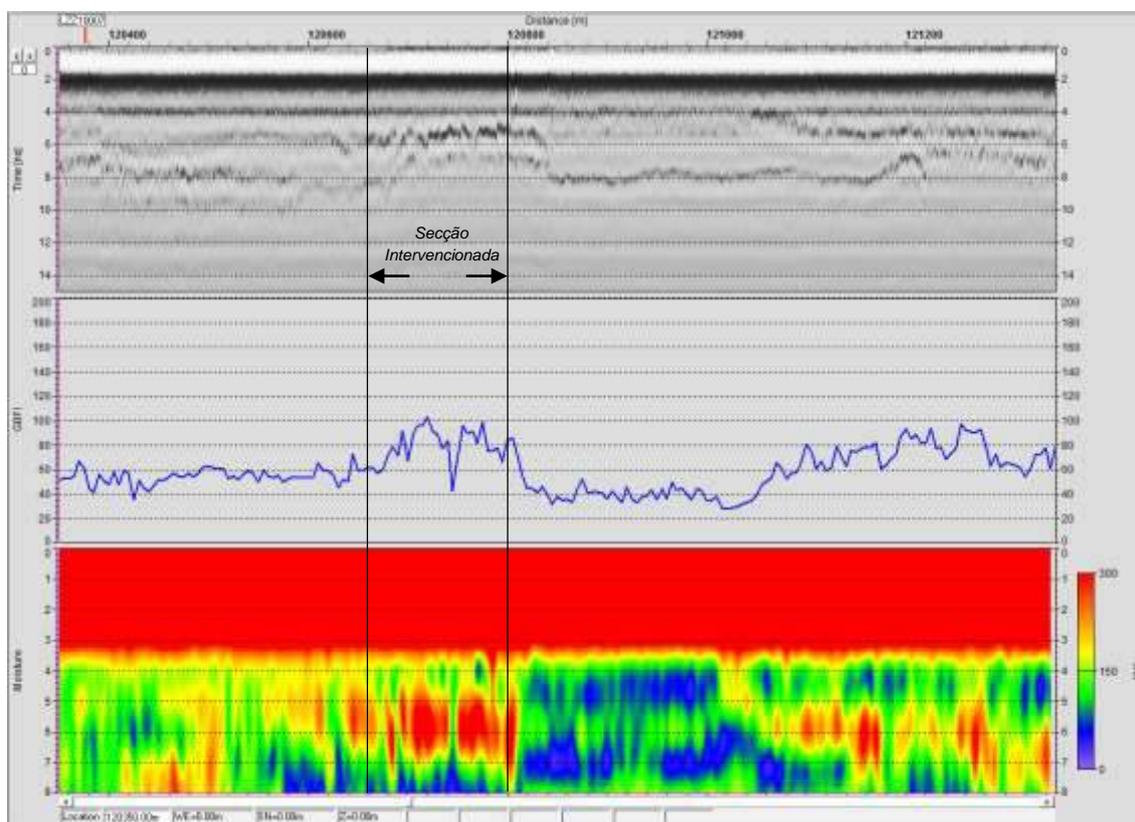


(b)

Figura 5.7 Resultados obtidos para a secção B, em 2012 (a) e em 2015 (b)

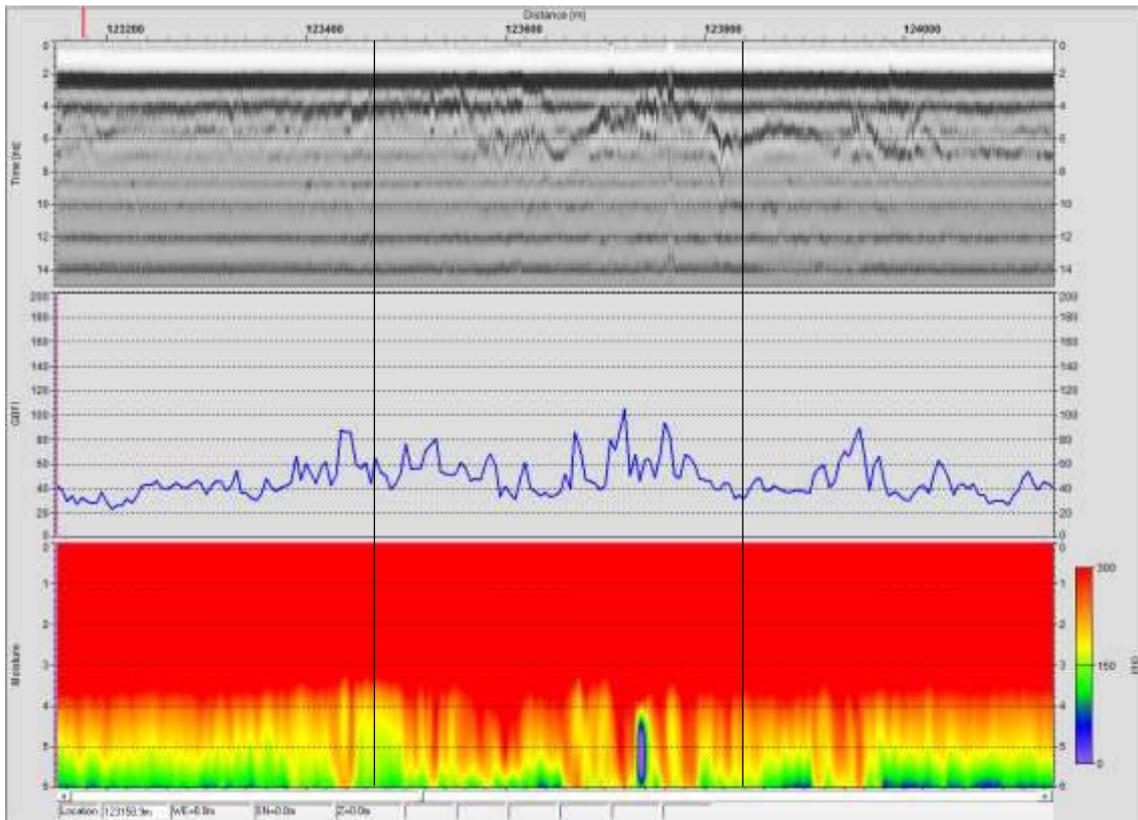


(a)

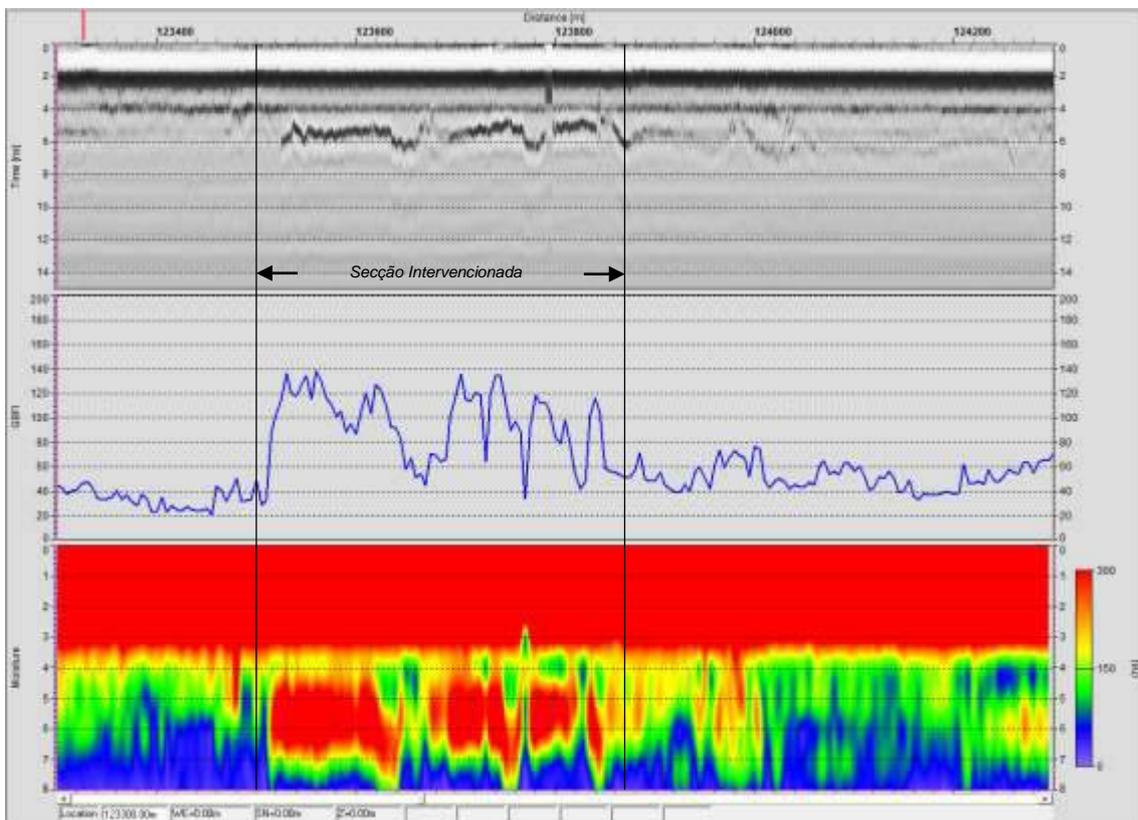


(b)

Figura 5.8 Resultados obtidos para a secção C, em 2012 (a) e em 2015 (b)

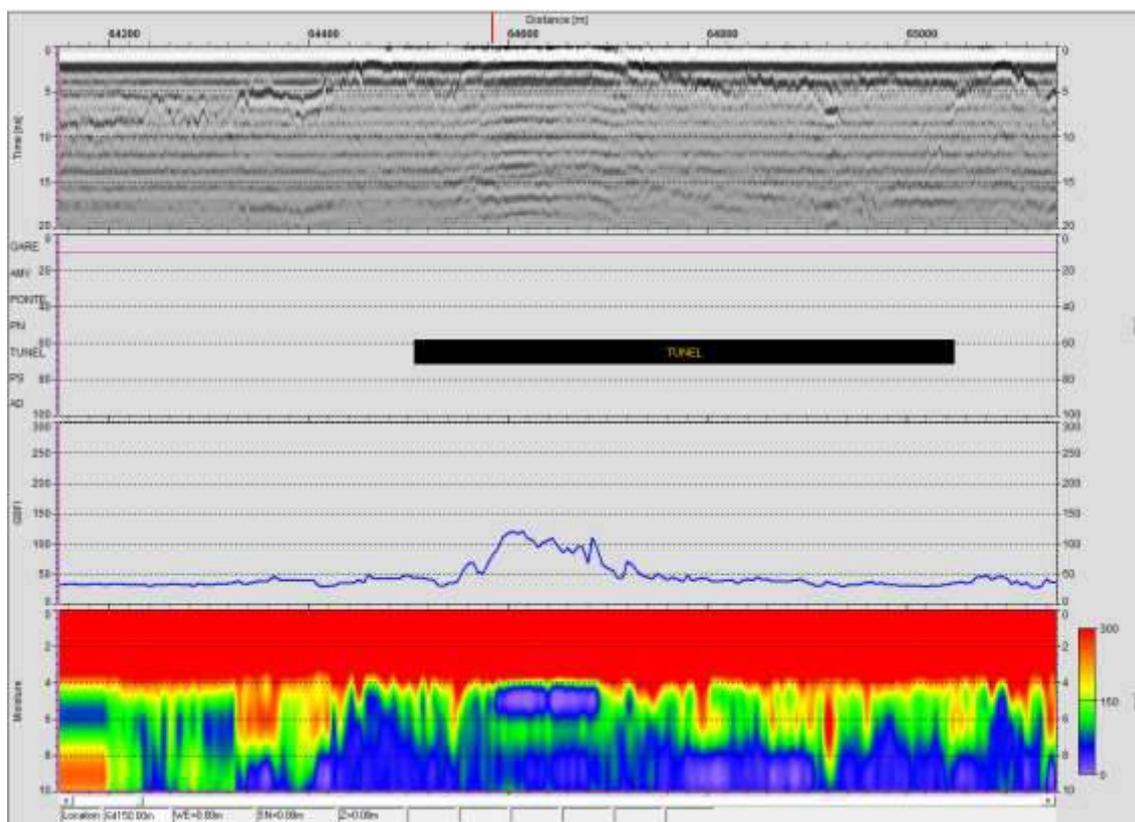


(a)

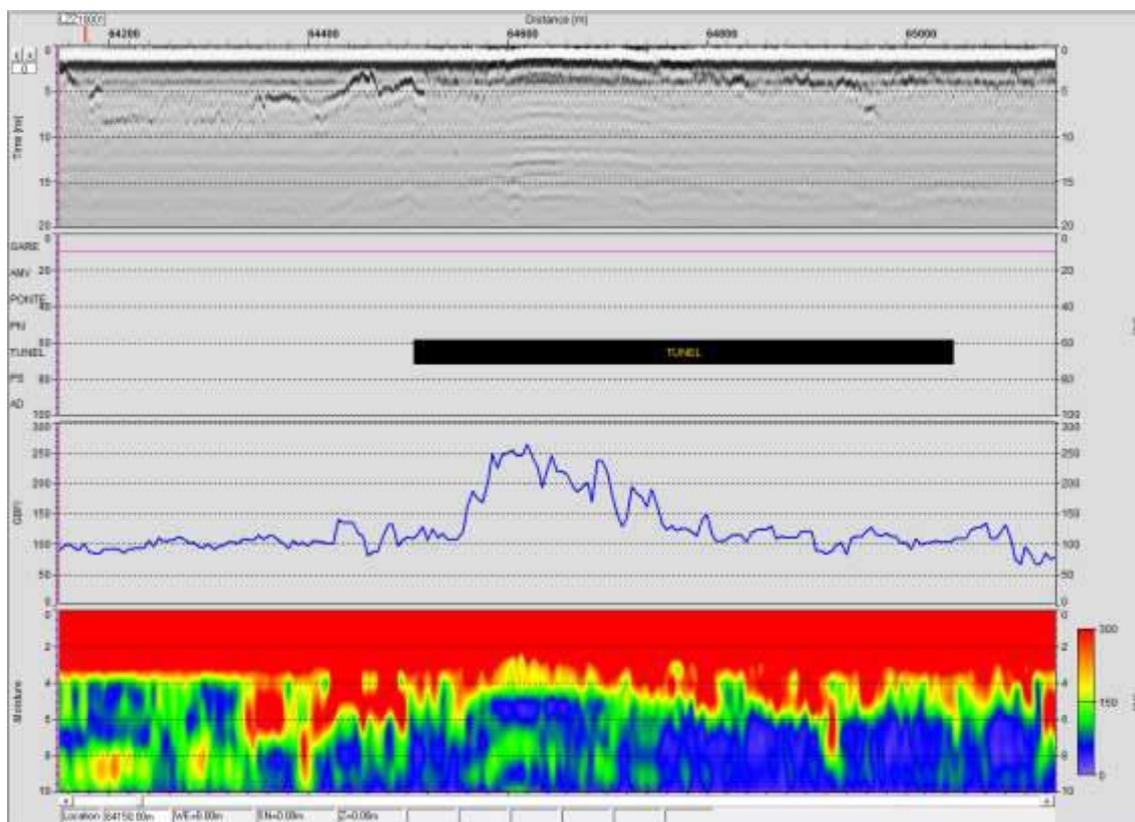


(b)

Figura 5.9 Resultados obtidos para a secção D, em 2012 (a) e em 2015 (b)



(a)



(b)

Figura 5.10 Resultados obtidos para a secção E, em 2012 (a) e em 2015 (b)

Em 2012, segundo a observação da Figura 5.6 (a), o índice do GBFI para a **secção A** variou entre 20 e 60, sendo que maioritariamente ao longo de grande parte da secção este valor foi da ordem dos 40, tendo-se verificado uma diminuição nos quilómetros finais, em que variou entre 20 e 40. Em relação ao teor em água notou-se uma variação constante ao longo de toda a secção.

Comparativamente aos dados de 2015, Figura 5.6 (b), verificou-se um aumento nos valores do GBFI, em que estes incidiram entre 80 e 100; mesmo na secção que foi alvo de manutenção, houve um aumento deste parâmetro. Observando ainda a mesma figura, são visíveis zonas pontuais com um teor em água mais elevado (representado a vermelho), o que indicia a acumulação de água naquelas zonas e, conseqüentemente, a presença/concentração de finos.

Para a **secção B**, segundo as medições realizadas em 2012 (Figura 5.7 (a)), antes da intervenção, o índice de contaminação presente em toda a secção foi tendencialmente de 40, não se detetando zonas com aparente necessidade de manutenção. O teor em água mostrou ser mais acentuado até aos 4 ns, tendo diminuído com a profundidade.

De acordo com os resultados obtidos em 2015 (Figura 5.7 (b)), é bastante evidente que a secção que foi alvo de intervenção apresentou um valor de GBFI muito superior comparativamente ao resto da secção apresentada. O teor em água naquele troço foi igualmente elevado, como seria expectável, uma vez que estes parâmetros estão interligados.

Na **secção C**, de acordo com os resultados demonstrados na Figura 5.8, verifica-se que, mais uma vez, a zona que foi intervencionada apresenta um índice de contaminação maior, passando de um valor de GBFI inferior a 40 para superior a 80. Observando ainda as secções imediatamente antes e após a intervenção verifica-se que o nível de contaminação também evoluiu, embora nestes casos este aumento não tenha sido tão expressivo. Relativamente ao teor em água, este foi mais significativo nas secções com índices de contaminação mais elevados.

De um modo geral, a **secção D** apresenta valores relativos à contaminação superiores aos registados anteriormente para a mesma campanha, resultados visíveis na Figura 5.9 (a). Contudo, ao analisar-se a campanha referente a 2015 verifica-se um aumento exponencial neste mesmo índice. No que diz respeito ao teor em água, as áreas mais acentuadas coincidem novamente com a zona intervencionada, o que indicia o elevado estado de degradação daquele troço.

Para a **secção E**, uma vez que corresponde à única secção que não foi alvo de ações de manutenção, um aumento no índice de GBFI era expectável, o que se veio a comprovar tendo em conta os resultados obtidos nas duas campanhas (ver Figura 5.10).

Contrariamente ao que se tem verificado, a secção associada ao maior índice de contaminação não apresenta um elevado nível de teor em água, eventualmente, devendo-se ao facto de corresponder à localização do túnel.

De referir que neste caso foi necessário readaptar a escala, de modo a conseguir-se visualizar o gráfico completo relativo ao GBFI, verificando-se valores neste índice até um máximo de 250, o que demonstra o seu elevado estado de contaminação.

- Medições com o sistema da GSSI

Em laboratório

De modo idêntico, ao que foi feito com as antenas da IDS em condições controladas, efetuaram-se esses mesmos procedimentos para estas antenas. Os resultados obtidos do índice de GBFI para cada amostra, encontram-se graficamente representados na Figura 5.11.

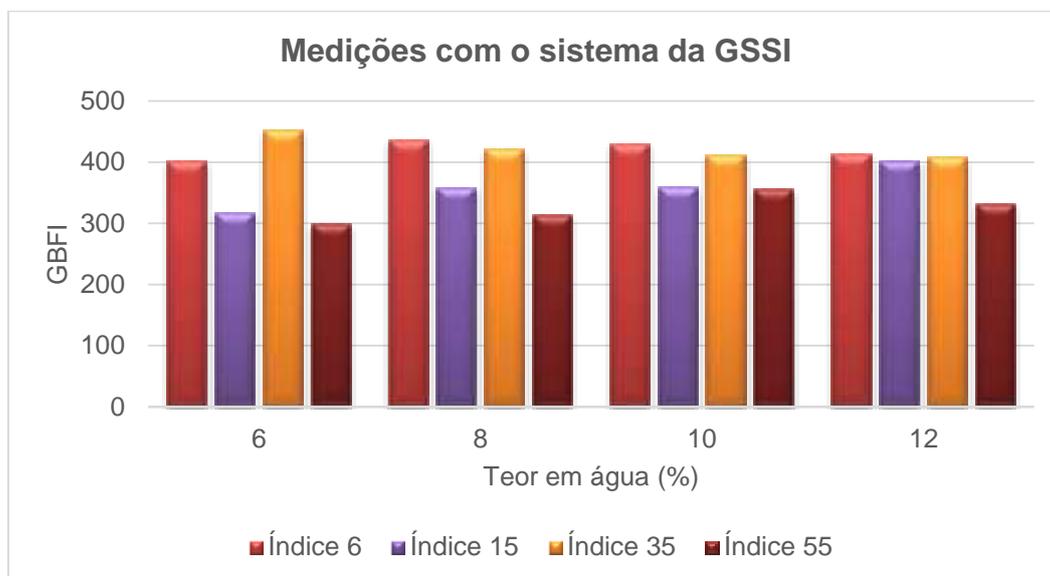


Figura 5.11 Resultados obtidos, para as amostras laboratoriais, do índice de GBFI com a antena de 1 GHz

Assim, tendo em conta os resultados apresentados verifica-se que para estas antenas os índices de contaminação obtidos embora tenham sido mais uniformes, na medida em que o aumento do teor em água não se refletiu num aumento do índice de GBFI, verificou-se, frequentemente, que o valor deste índice para a amostra com maior grau de contaminação (índice 55) era inferior ao de amostras com contaminação mais baixa, não sendo coerente com o esperado.

Ainda de notar que, os resultados obtidos pelo equipamento da IDS são constantemente inferiores aos registados pelas antenas da GSSI, possivelmente devido à resolução e/ou máxima profundidade de penetração associada a cada uma das antenas.

In situ

Seguindo o mesmo procedimento, apresentam-se de seguida os resultados obtidos com as antenas da GSSI para os dados recolhidos em campo (secções F e G). De realçar que os poços encontram-se igualmente representados (em tons de castanho) nas respetivas secções.

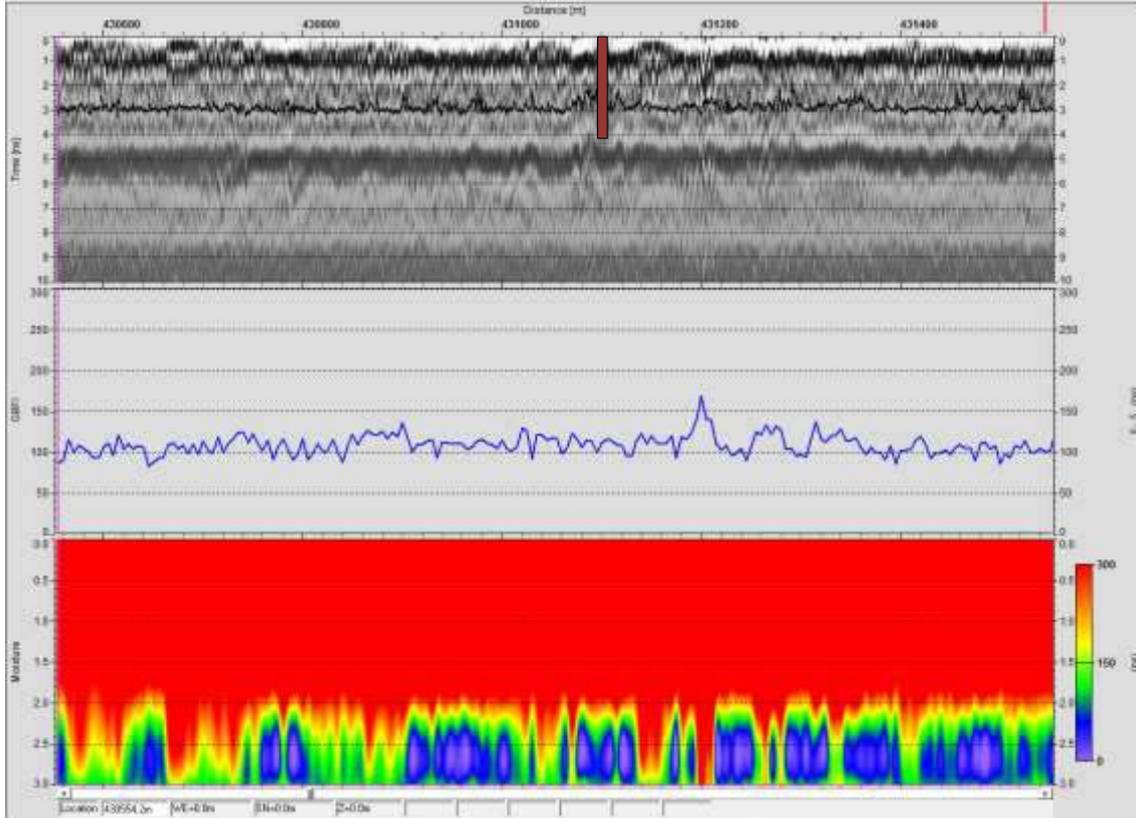


Figura 5.12 Resultados obtidos para a secção F

Tendo em conta a informação fornecida, sabe-se que neste troço a camada de balastro apresentava uma espessura de 14 cm e as suas partículas se encontravam no estado “limpo”. Observando então os gráficos, verifica-se que, ao longo dos 1000 m analisados, o índice do GBFI estabilizou no 100, variando de forma pouco significativa ao longo de toda a secção.

Relativamente ao teor em água, não se conseguiu uma análise muito profunda, pois apenas se obteve resultados até aos 3 ns, como se verifica. Por esse motivo, não se consegue aferir conclusões acerca do nível de teor em água associado a esta camada.

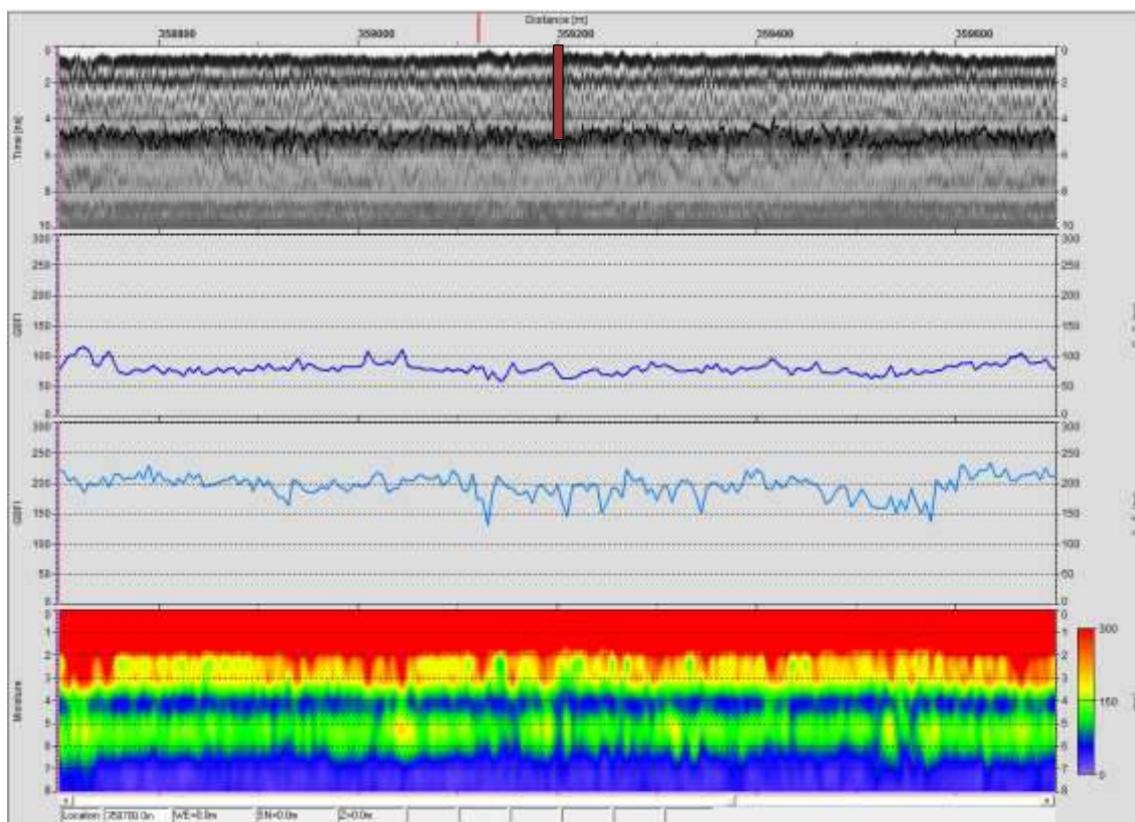


Figura 5.13 Resultados obtidos para a secção G

De acordo com a informação recolhida através do poço, sabe-se que a camada de balastro referente a esta secção contém material no estado limpo e no estado contaminado. Por esse motivo, efetuaram-se duas análises distintas, referente a cada uma das camadas, de modo a facilitar a análise e não induzir informações erradas.

Em primeira instância, é preciso esclarecer que para a delimitação do início/fim de cada camada foi necessário observar atentamente tanto o ficheiro proveniente do radar como o sinal eletromagnético no domínio do tempo, com as respetivas reflexões. Nesse sentido, foi possível aferir os nano segundos correspondentes a cada camada, definindo-se entre 0 e 2 ns para a camada com material “limpo” e entre 2 e 5 ns para o material “contaminado”.

O primeiro gráfico do GBFI, correspondendo ao balastro limpo, permite observar que os valores deste índice se encontram maioritariamente entre 50 e 100. Contrariamente ao que se verifica para a segunda camada, apresentando um valor de GBFI na ordem dos 200. Assim, verifica-se que o programa tem sensibilidade em identificar secções com mais contaminação do que outra.

Da observação do gráfico referente ao teor em água, verifica-se que o programa deteta uma zona em que a presença de água é mais sentida (representada a verde), localizada entre duas camadas com um teor em água mais baixo, o que leva a crer que existe acumulação de finos naquela zona, representando, deste modo, um possível indício de material contaminado aí presente.

Neste caso, caso se desconhecem-se as condições desta camada de balastro, através da análise efetuada era possível detetar a existência de material contaminado, tanto pelo índice do GBFI como pela observação do teor em água, uma vez que os resultados se mostraram coerentes.

5.5.2 Análise da Amplitude do sinal

A análise da amplitude do sinal foi realizada apenas para os dados de laboratório, uma vez que correspondem a medições estáticas fazendo com que este parâmetro seja constante nessas amostras. Contrariamente ao que se verifica para os dados medidos em campo, daí este parâmetro não ter sido objeto de estudo nessas secções (A, B, C, D, E e F). De referir ainda que será expectável que a amplitude do sinal diminua com o aumento da contaminação presente no meio, uma vez que esta tem uma grande influência no sinal emitido pelo radar.

De seguida, apresentam-se então os resultados obtidos para a variação da amplitude do sinal dos registos do radar em laboratório, em função do teor em água do meio e respetivo índice de contaminação.

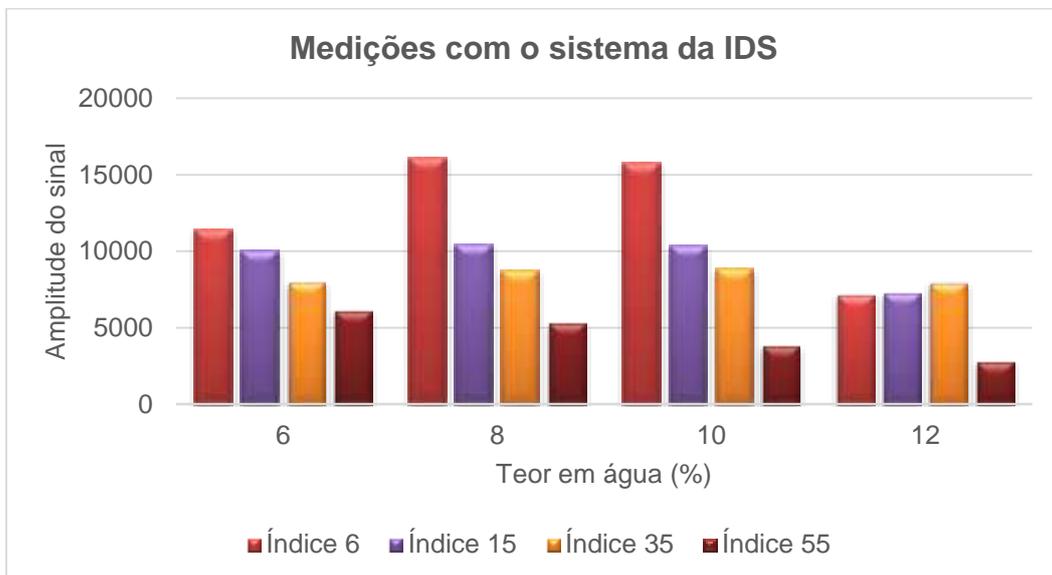


Figura 5.14 Resultados obtidos, para as amostras laboratoriais, da amplitude do sinal com a antena de 400 MHz

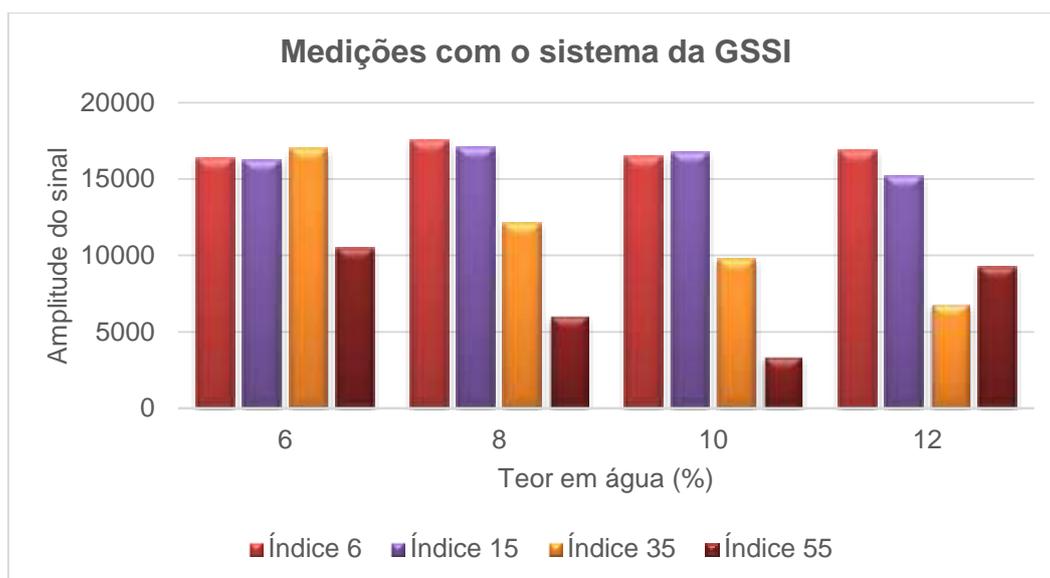


Figura 5.15 Resultados obtidos, para as amostras laboratoriais, da amplitude do sinal com a antena de 1 GHz

De um modo geral, verifica-se que a amplitude do sinal diminui com o aumento do índice de contaminação, tal deve-se ao facto de a presença de balastro contaminado afetar fortemente a propagação da onda eletromagnética, refletindo-se na amplitude do sinal registado. Verifica-se ainda que esta observação foi mais notória para o equipamento da IDS comparativamente ao sistema da GSSI.

Relativamente ao teor em água, os resultados mostraram-se bastante díspares para ambas as antenas. Contudo, verifica-se que para os índices 35 e 55 do sistema GSSI existe uma certa tendência do valor da amplitude ir diminuindo com o aumento do teor em água, resultado que seria expectável para todos os índices.

Ainda de notar que, novamente, os resultados obtidos em termos de amplitude de sinal pelo equipamento da IDS são inferiores aos registados pelas antenas da GSSI.

5.6 Dificuldades sentidas na análise e cuidados a ter na interpretação

De facto, é de realçar que localizar a posição exata da interface dielétrica num perfil do radar de prospecção não é assim tão evidente. Geralmente, ocorrem várias reflexões, surgindo diversos “picos” de amplitude (positivos e negativos) no perfil obtido, cabe assim ao intérprete seleccionar um destes “picos” em detrimento dos restantes.

De forma a evidenciar a principal dificuldade sentida na fase de processamento dos dados que poderá condicionar posteriormente a sua interpretação, atente-se na Figura 5.16.

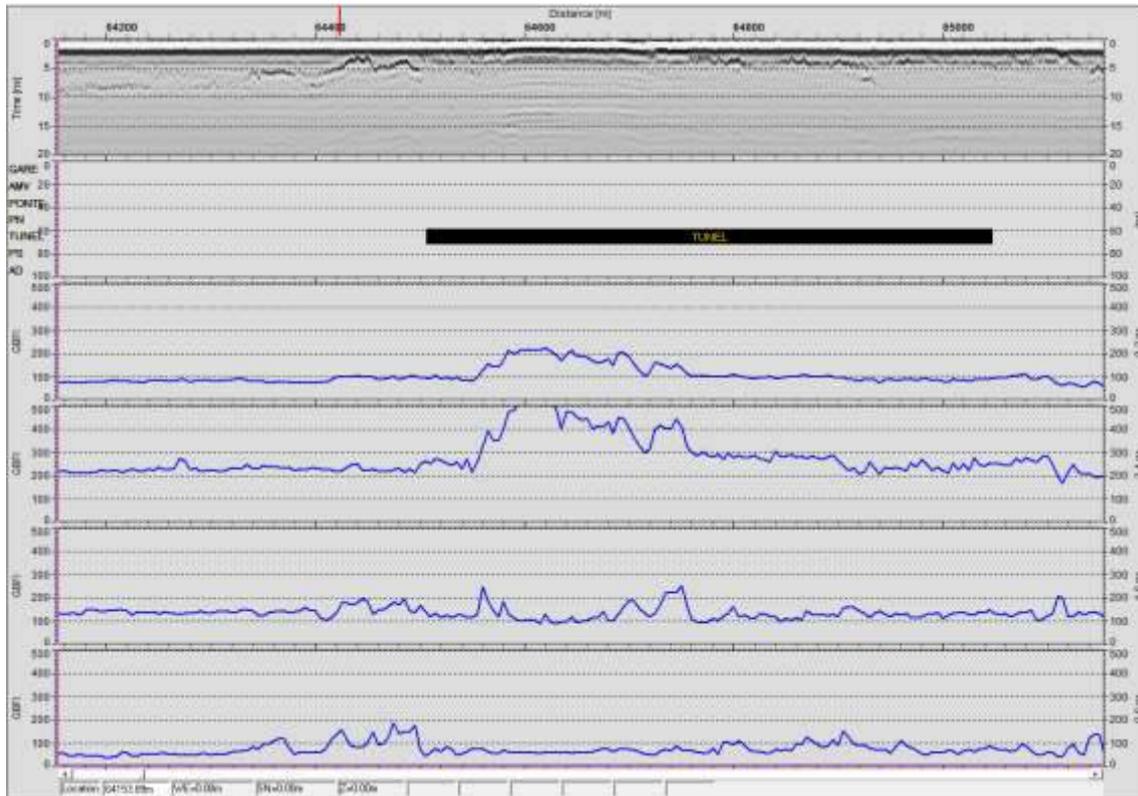


Figura 5.16 Análises obtidas considerando diferentes intervalos de tempo: 0-2ns, 2-4ns, 4-6ns e 0-6ns

Na Figura 5.16, exemplifica-se quatro análises diferentes obtidas pelo programa de interpretação utilizado, em que se considerou diferentes nano segundos para cada uma, com o intuito de averiguar a sua variabilidade nos resultados daí obtidos.

Assim, tendo em conta os resultados apresentados, é bastante perceptível que uma pequena alteração nos nano segundos a considerar, afeta fortemente os resultados, podendo levar a interpretações pouco realistas das condições da camada em análise.

Atente-se no último gráfico em que a análise ocorreu entre 0 e 6 ns, é visível que o programa em questão não consegue ter sensibilidade em identificar troços onde a contaminação seja mais elevada, quando a análise é definida para uma secção com maior espessura. O que comprova, mais uma vez, que as análises feitas por este programa dependem essencialmente do utilizador em causa, representando assim uma enorme desvantagem.

É evidente que a adoção destes valores deve ser ponderada e após observação cuidada, tanto do radargrama como das diferentes reflexões registadas pelo equipamento, contudo, por vezes demonstra ser uma tarefa bastante difícil, principalmente quando se verifica uma alteração gradual da condição do material granular, não se conseguindo delimitar com precisão a interface de cada camada.

5.7 Considerações finais

Ao se avaliar os resultados obtidos pelas diferentes vias, ou seja, comparando a informação dos ensaios de laboratório e *in situ* com os resultados obtidos através do programa comercial de interpretação, foi possível apurar a eficácia deste programa na avaliação de características das camadas de apoio. Deste modo, destacam-se de seguida as principais conclusões a reter, tendo em conta as análises abordadas neste capítulo:

Índice de contaminação (GBFI)

Para as amostras laboratoriais, os resultados obtidos, por ambas as antenas, mostraram-se muito díspares, não existindo coerência nos valores obtidos, o que impossibilitou estabelecer uma gama de valores associada a cada índice. Contudo, para as medições *in situ*, o programa mostrou sensibilidade em localizar zonas que, à partida, estão mais deterioradas, podendo deste modo afirmar-se que qualitativamente os resultados que se obtêm poderão ser interessantes, embora a nível quantitativo fiquem muito aquém.

Teor em água

Por um lado, as medições relativas ao laboratório, mostraram alterações pouco significativas ao avaliar-se o nível de teor em água presente no meio, tanto para as antenas da IDS como para as da GSSI. Por outro lado, nos dados medidos em campo, foi notória a variação deste parâmetro ao detetar as zonas mais contaminadas.

De um modo geral, os resultados apresentados mostraram-se inconclusivos, pois as secções que foram alvo de manutenção apresentaram frequentemente valores elevados tanto ao nível da contaminação como do teor em água.

É importante salientar que a versão do programa utilizado foi a mais antiga, podendo-se com as novas versões obter resultados mais fidedignos. Como já referido, são necessários alguns cuidados aquando do processamento do sinal, pois os resultados obtidos pelo programa de interpretação utilizado, em particular na identificação da interface entre a camada de balastro e a camada de sub-balastro ou da fundação, ao dependerem fortemente do nível de contaminação presente no meio, se existir uma transição gradual entre os dois materiais tornam esta distinção mais difícil de identificar.

Capítulo 6

6. ANÁLISE DO SINAL DO RADAR EM FREQUÊNCIA

6.1 Contextualização

Nas pesquisas desenvolvidas recentemente para a determinação da qualidade do balastro ferroviário, tem vindo a ser feita uma abordagem menos convencional: a análise do sinal no domínio da frequência.

De acordo com a informação recolhida, a distinção entre “balastro limpo” e “balastro contaminado” poderá ser feita com a informação da frequência proveniente do sinal GPR [17]. Sabe-se que o elevado teor de finos e o aumento da quantidade de água absorvida provoca uma dispersão dielétrica, o que possibilita assim esta análise.

Atente-se na figura seguinte, todos os sinais no domínio de tempo são representados por um único valor que descreve a sua amplitude em qualquer instante no tempo. Nesse sentido, recorrendo-se a uma transformada, conhecida como Transformada de Fourier, é possível então obter-se esse mesmo sinal no domínio da frequência.

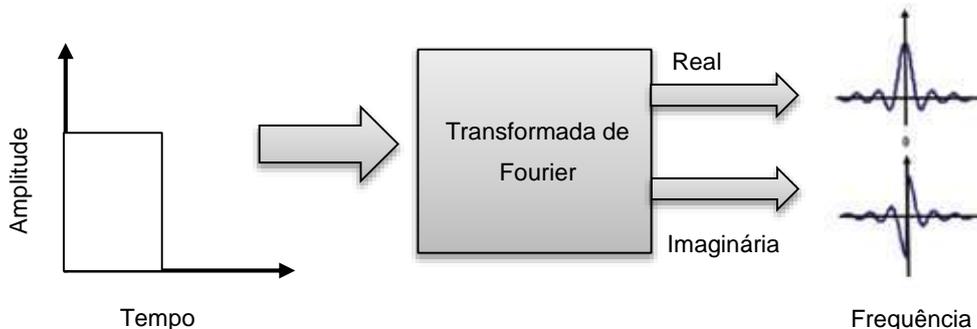


Figura 6.1 Conceito subjacente à transformada de Fourier, adaptado [25]

O objetivo deste método é converter os dados recolhidos pelo radar de prospecção no domínio do tempo para o domínio da frequência, permitindo deste modo analisar as diferentes contribuições da frequência que compõem o sinal registado e, conseqüentemente, obter informações sobre a qualidade do material.

Na figura seguinte, apresenta-se um exemplo de um sinal GPR obtido no domínio do tempo (a) e esse mesmo sinal representado no espectro da frequência (b).

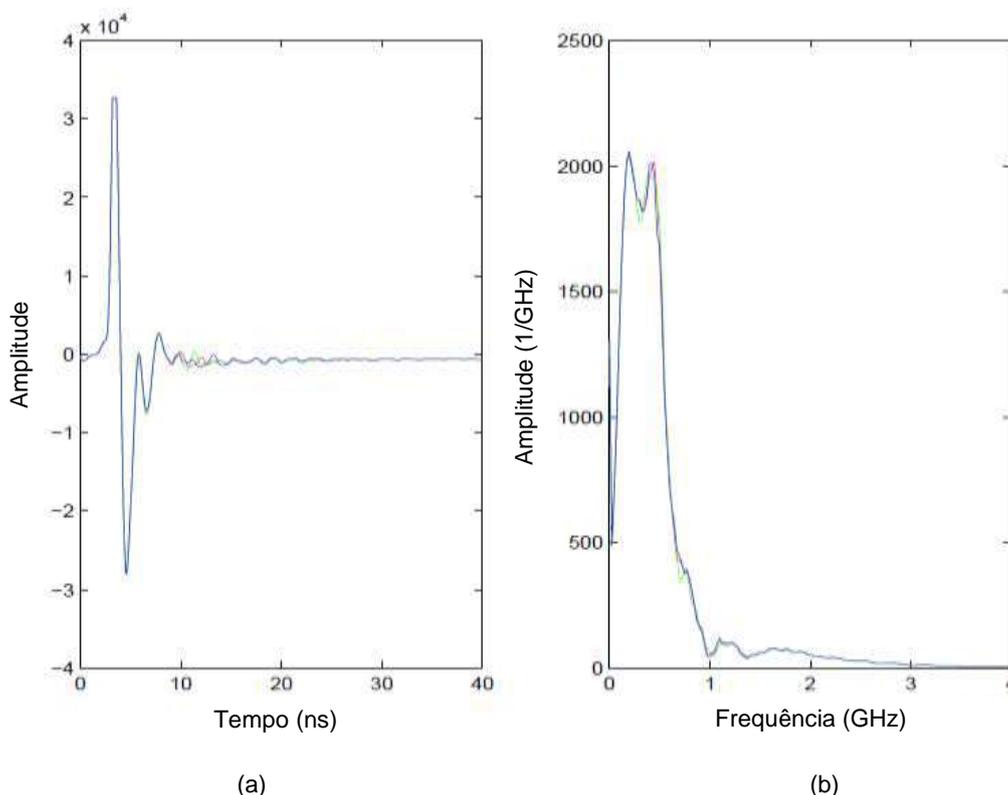


Figura 6.2 Exemplo de um sinal registado no domínio do tempo (a) e no espectro da frequência (b)

Assim, o sistema de registo utilizado é um “analisador espectral” [2], o qual capta o sinal no domínio do tempo (amplitude versus tempo), em que os sinais são amplificados, digitalizados e gravados, e posteriormente esses registos são transformados para o domínio da frequência (amplitude versus frequência), usando o algoritmo para esse efeito.

Este capítulo é dedicado particularmente ao tratamento de dados recorrendo ao programa de cálculo numérico *Matlab* por forma a averiguar eventuais mudanças na qualidade das medições efetuadas. Assim, no sentido de esclarecer e facilitar a compreensão daquilo que foi feito, salientam-se de seguida alguns conceitos teóricos subjacentes a esta análise.

6.2 Análise de Fourier

A representação no domínio do tempo está presente naturalmente no nosso dia-a-dia. Contudo, certas operações, sobretudo na área de Engenharia, tornam-se mais simples e esclarecedoras se se trabalhar no domínio da frequência. A análise de Fourier (também conhecida como análise harmónica) pretende facilitar esse estudo, caracterizando-se por ser uma análise que representa (ou aproxima) funções genéricas por meio da soma de funções sinusoidais complexas [34]; permitindo assim decompor um sinal nas suas componentes em frequência, tendo diversas aplicações nas mais variadas áreas.

Originalmente, a análise de Fourier focava-se em representar e analisar fenómenos periódicos, recorrendo à chamada Série de Fourier. Mais tarde, estendeu-se a outros fenómenos (não periódicos), através da Transformada de Fourier.

Assim sendo, Fourier considera diferentes representações dependendo do tipo de sinal em causa. Um sinal pode ser contínuo ou discreto, podendo ainda ser classificado como periódico ou não periódico. A combinação destas duas características dá origem a quatro categorias [34]: periódico contínuo, não periódico contínuo, periódico discreto e não periódico discreto; abordados e analisados de seguida.

Tabela 6.1 Categorias definidas por Fourier em função do tipo de sinal

		<i>Sinal</i>	
		Periódico	Não periódico
<i>Tempo</i>	Contínuo	SF	TF
	Discreto	SDF (ou TFD)	TFTD

Em que:
SF – Série de Fourier
TF – Transformada de Fourier
SDF – Série Discreta de Fourier (ou Transformada de Fourier Discreta (TFD))
TFTD – Transformada de Fourier de Tempo Discreto

Observando a Tabela 6.1, verifica-se que as diferentes categorias existentes correspondem a uma análise de Fourier diferente. De acordo com [34], estes quatro tipos de sinais são descritos da seguinte forma:

- ❖ **Periódico Contínuo:** esta classe de sinais engloba todos aqueles que se repetem infinitamente num padrão regular (desde o infinito negativo até ao infinito positivo). Como exemplo, destacam-se as ondas sinusoidais e ondas quadráticas. Esta versão da análise de Fourier é denominada por **Série de Fourier (SF)**.
- ❖ **Não Periódico Contínuo:** este tipo de sinal é caracterizado por se estender desde o infinito negativo até ao positivo sem repetições num padrão periódico. Os decaimentos

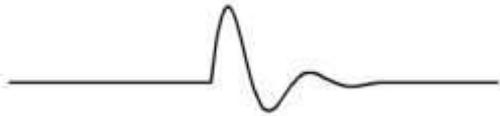
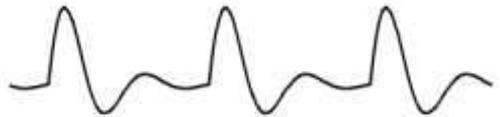
exponenciais e a curva Gaussiana são exemplos deste tipo de sinal. A análise de Fourier adotada neste caso é conhecida como **Transformada de Fourier (TF)**.

- ❖ **Periódico Discreto:** estes são sinais discretos que se repetem periodicamente ao longo do infinito. A classe de Fourier aplicada neste tipo de sinal é conhecida como **Série Discreta de Fourier (SDF)**, embora seja também frequentemente referenciada como **Transformada de Fourier Discreta (TFD)**.
- ❖ **Não Periódico Discreto:** esta classe de sinais é definida como pontos discretos (entre o infinito positivo e negativo) que não se repetem de forma periódica. Neste caso, a análise de Fourier subjacente é denominada por **Transformada de Fourier de Tempo Discreto (TFTD)**.

As designações destas quatro categorias definidas por Fourier podem parecer um pouco confusas ou mal organizadas, devendo-se ao facto de terem evoluído “ao acaso” ao longo dos anos [34].

Daí deve-se chamar à atenção, pois diferentes autores adotam designações diferentes para a mesma categoria. Para facilitar a compreensão dos conceitos referidos anteriormente, atente-se na Tabela 6.2 em que se ilustram as quatro transformadas propostas por Fourier.

Tabela 6.2 Ilustração das quatro transformadas de Fourier [34]

Tipo de Transformada	Sinal de exemplo
Transformada de Fourier (sinais contínuos e não periódicos)	
Série de Fourier (sinais contínuos e periódicos)	
Transformada de Fourier de Tempo Discreto (sinais discretos e não periódicos)	
Transformada de Fourier Discreta (sinais discretos e periódicos)	

Outra particularidade que se deve salientar é o facto destas quatro classes se definirem ao longo do infinito, ou seja, estes sinais estendem-se desde o infinito negativo até ao infinito positivo. Tal fenómeno ocorre porque o seno e o cosseno, por definição, são funções que variam de $-\infty$ até $+\infty$. Assim sendo, não há uma versão da análise de Fourier que use sinais com comprimento finito que, curiosamente, são esses os casos de utilização prática [35]; a título de exemplo considere-se um sinal gravado no computador composto por 1024 pontos.

Para contornar esse problema, caso se tenha um número finito de amostras armazenadas, deve-se imaginar que o sinal tem um número infinito de amostras à esquerda e à direita das amostras reais. Se todas estas amostras “imaginadas” tiverem zero como valor, o sinal obtido será idêntico a um sinal não periódico e discreto, possibilitando assim a aplicação da Transformada de Fourier de Tempo Discreto. Alternativamente, as amostras imaginadas podem, ao invés de zero, ser uma repetição do sinal finito original. Neste caso, o sinal pareceria periódico e discreto, com o período de 1024 amostras se seguirmos o exemplo anterior. Esta alternativa requereria assim a utilização da Transformada de Fourier Discreta [34].

Contudo, estas simplificações não são assim tão simples, pois é necessário um número infinito de sinusoides para sintetizar um sinal não periódico; tornando-se inviável (até mesmo impossível) calcular a Transformada de Fourier de Tempo Discreto através de um algoritmo de um computador. Por outras palavras, os computadores digitais trabalham apenas com informação que é discreta e de comprimento finito [34]. Por exclusão de partes, a única transformada de Fourier que pode ser utilizada em processamento de sinal (DSP, na literatura inglesa *Digital Signal Processing*) é a Transformada de Fourier Discreta (DFT, *Discrete Fourier Transform*). Contudo, a execução de uma análise DFT veio a verificar-se um processo computacionalmente exigente, acabando por surgir outras técnicas que facilitam esse cálculo. Hoje em dia uma das formas para o cálculo da DFT, sem exigir grande esforço computacional, tem por base uma Transformada Rápida de Fourier que será objeto de análise de seguida.

6.2.1 Transformada Rápida de Fourier (FFT)

A sigla FFT é a abreviatura de “Fast Fourier Transform” que tem por base um algoritmo que permite calcular a Transformada de Fourier Discreta. É importante esclarecer que a FFT não é uma nova abordagem de Fourier, isto é, não corresponde a um tipo de transformada diferente daquelas mencionadas anteriormente; esta apenas diz respeito a um algoritmo bastante eficiente que permite o cálculo da DFT.

Segundo Fourier, qualquer sinal periódico pode ser representado por um somatório infinito de séries de ondas sinusoidais separadas pela frequência da repetição do sinal no domínio de tempo [25], processo que ficou então conhecido como a Transformada de Fourier, como se viu. É ainda de referir que o processo inverso pode também ser aplicado, ou seja, transformar uma

série de ondas sinusoidais a partir de um domínio de frequência para um domínio de tempo, denominado Transformada de Fourier Inversa.

Pretende-se ressaltar que o domínio da frequência contém exatamente a mesma informação contida no domínio do tempo. Dado o sinal no domínio do tempo, é usual denominar-se ao processo de cálculo para o domínio da frequência por decomposição, análise ou DFT. Contrariamente, tendo o sinal no domínio da frequência, o cálculo para o domínio do tempo chama-se síntese ou DFT Inversa.

Genericamente, considerando uma função real no tempo $x(t)$, é possível definir a sua Transformada de Fourier $X(\omega)$ correspondente, tal que:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \times e^{-i\omega t} dt \quad (12)$$

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) \times e^{i\omega t} d\omega \quad (13)$$

Em que $\omega = 2\pi f$ corresponde à frequência angular, t é a variável tempo e i é a unidade imaginária. Tendo em conta o que foi dito anteriormente, é comum definir-se a primeira expressão como “equação de análise” e a segunda como “equação de síntese”.

No estudo do sinal do radar, amostra discreta, as frequências consideradas podem ser caracterizadas por:

$$f_n = \frac{1}{T} \frac{n}{N} \quad (14)$$

Em que:

- N corresponde ao número de pontos da amostra
- $n = 0, 1, \dots, N - 1$
- T é o intervalo de tempo de amostragem

Desta forma, a frequência f_n iniciar-se-á em zero e alcançará um valor limite representado por $f_s = 1/T$, denominado habitualmente por frequência de Shannon. Importa salientar que o algoritmo da FFT só calculará até à frequência de Shannon, com um intervalo de frequência equiespaçada de $\Delta f = 1/TN$.

É perceptível que para se aplicar a Transformada de Fourier é então necessário o conhecimento de duas informações *a priori*. Estas podem ser, por exemplo, ou a amplitude e a fase de uma senoide (coordenadas polares) ou as partes reais e imaginárias de um número complexo (coordenadas cartesianas); é imprescindível o conhecimento destes dados de “input” pois só assim a descrição no domínio da frequência fica completa.

Assim, é frequente dizer-se que o sinal de entrada está no domínio do tempo, uma vez que o tipo de sinal mais comum a entrar na DFT é composto por amostras medidas em intervalos regulares de tempo. O termo domínio da frequência é utilizado para descrever as amplitudes das ondas de seno e cosseno que compõem o sinal.

6.3 Equações matemáticas subjacentes

Jean Joseph Fourier, matemático francês, descobriu que “qualquer função periódica, por mais complicada que seja, pode ser decomposta como uma soma de funções seno e cosseno” [36], que por sua vez podem ser escritas como uma função exponencial de números complexos, como se verá de seguida.

De facto, algumas equivalências matemáticas estão subjacentes aos conceitos referidos anteriormente, nomeadamente as relações de Euler que se apresentam de seguida [37]. A primeira expressão mostra assim como as funções seno e cosseno se traduzem em exponenciais complexas.

$$e^{i\omega t} = \cos(\omega t) + i\sin(\omega t) \quad (15)$$

Algebricamente, a expressão anterior pode ainda ser reescrita tomando as seguintes formas:

$$\cos(\omega t) = \frac{e^{i\omega t} + e^{-i\omega t}}{2} \quad (16)$$

$$\sin(\omega t) = \frac{e^{i\omega t} - e^{-i\omega t}}{2i} \quad (17)$$

Estes resultados mostraram-se de extrema importância, uma vez que deste modo foi possível desenvolver uma forma de escrever equações que relacionam sinais sinusoidais e números complexos; resultado bastante vantajoso para o estudo em causa.

6.4 Metodologia adotada

Para uma melhor compreensão da metodologia adotada no presente trabalho, salientam-se as considerações tidas em conta nesta análise. Conforme mostra a Figura 6.3, a Transformada Discreta de Fourier modifica um sinal de entrada com N pontos, que traduzem o número de amostras registadas no domínio do tempo, em dois sinais de saída no domínio da frequência, com comprimento de $N/2 + 1$ pontos. Tanto a Figura 6.3 como a Figura 6.1 sugerem que ao aplicar-se a DFT, esta produz dois sinais distintos: um correspondente à parte real (representada como $Re X[]$) e outro à parte imaginária (representada como $Im X[]$).

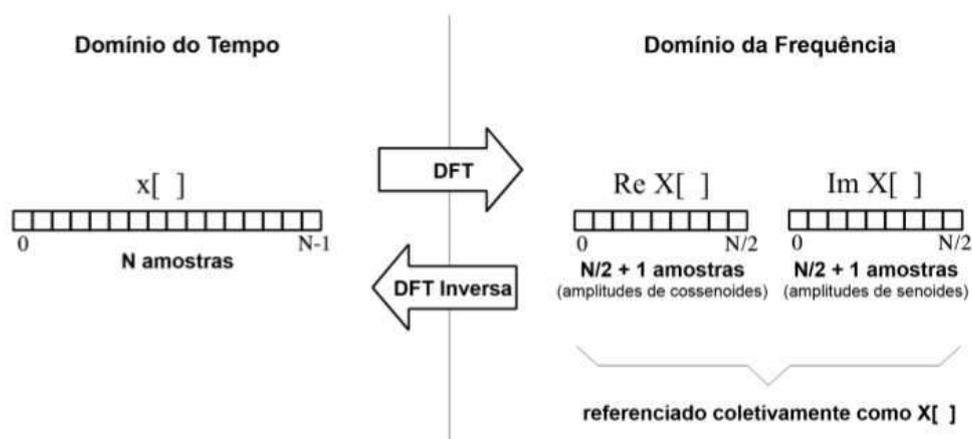


Figura 6.3 Terminologia da DFT [34]

Tal como representado na Figura 6.3, a dimensão no domínio do tempo varia de 0 até $N - 1$ enquanto em cada um dos sinais no domínio da frequência este varia de 0 a $N/2$. Geralmente, o número de amostras no domínio do tempo é representado pela variável N . Apesar de N poder ser qualquer número inteiro positivo, por questões relacionadas com a eficiência computacional dos algoritmos de cálculo da FFT, é comum ser escolhida uma potência de dois, isto é, 128, 256, 512, etc.

Conforme foi referido no Capítulo 4, nos procedimentos de preparação e condução do ensaio, em infraestruturas de transporte habitualmente consideram-se 512 amostras por “scan”, valor que foi adotado neste trabalho. Assim sendo, tem-se: $N = 512$ que representa o número de amostras no domínio do tempo, o sinal neste domínio está contido no vector $x[]$ e varia então de $x[0]$ até $x[511]$; por sua vez, os sinais no domínio da frequência estão contidos em dois vetores: $Re X[0]$ a $Re X[256]$ e $Im X[0]$ a $Im X[256]$. Note-se que os 512 pontos definidos no domínio do tempo correspondem a 257 pontos (amostras) em cada um dos sinais no domínio da frequência.

6.5 Processamento e Interpretação dos resultados

6.5.1 Particularidades da análise em frequência

No subcapítulo em que se apresentaram os casos de estudo, foi referido que para as secções A, B, C, D e alguns troços da secção E, as travessas utilizadas foram do tipo bibloco (Figura 6.4 (a)). Apesar de não ter tido uma importância considerável para a análise executada no capítulo anterior, neste capítulo isso já não acontece. Tal deve-se ao facto deste tipo de travessas conterem peças metálicas que unem os blocos de betão, o que correspondem a refletores significativos para a análise em questão.

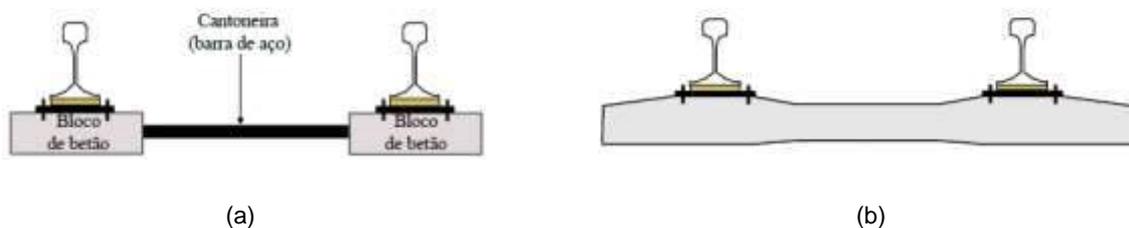


Figura 6.4 Tipos de travessas de betão: (a) travessa bibloco; (b) travessa monobloco [38]

De referir que a reflexão produzida por estas peças é evidenciada por hipérboles próximas e sobrepostas nos radargramas no domínio do tempo, de modo semelhante ao que se observa, no interior de uma laje de betão armado, quando se identificam sucessivos varões de uma armadura de aço colocados na direção perpendicular à do movimento da antena.

6.5.2 Resultados obtidos após a aplicação da FFT

Para os resultados que se apresentam de seguida, é importante esclarecer que optou-se por escolher diferentes escalas dependendo da amostra a analisar. Para as amostras laboratoriais, a escala horizontal, no domínio do tempo, varia entre 0 e 15 ns enquanto para as medições realizadas *in situ* optou-se por 0 e 20 ns. Para a representação do sinal no espectro da frequência, considerou-se até 2 GHz e 1,2 GHz, referentes às medições em laboratório e em campo, respetivamente.

Contudo, devido à diferença de parâmetros observada nos registos *in situ* das duas campanhas, nas medições efetuadas com as antenas da IDS, foi necessário adotar diferentes escalas verticais no domínio da frequência, de modo a facilitar a visualização do sinal daí obtido e evitando-se assim não só induzir a análise em erro, pois existem diversas grandezas a variar, como também a tirar conclusões precipitadas ou até mesmo pouco realistas.

- Medições com o sistema da IDS

Em laboratório

A título de exemplo, apresentam-se de seguida os resultados obtidos para o índice de contaminação 6 com um teor em água de 8% e para o índice de contaminação 55 e teor em água de 10%, de modo a averiguar-se eventuais mudanças do sinal em cada espectro obtido. Os resultados dos restantes índices de contaminação e respetivos teores em água encontram-se demonstrados em anexo.

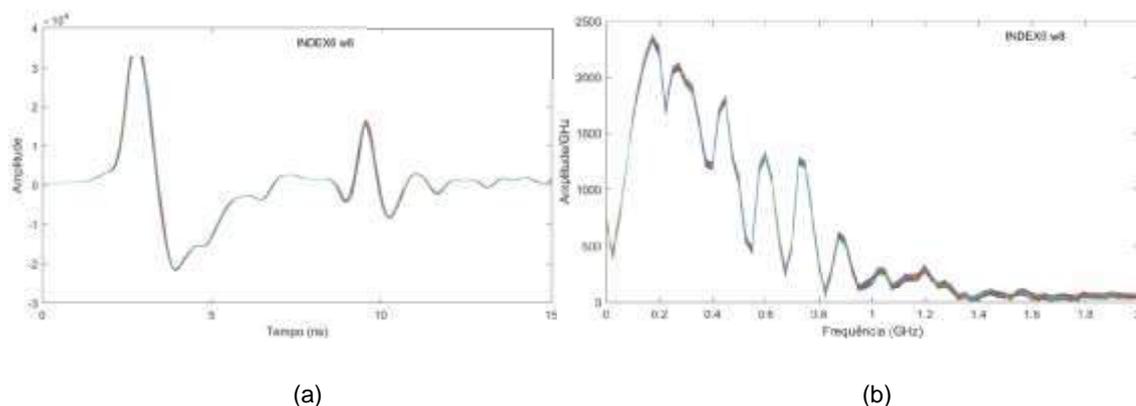


Figura 6.5 Resultados obtidos para o índice de contaminação 6 e $w = 8\%$ com as antenas da IDS: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

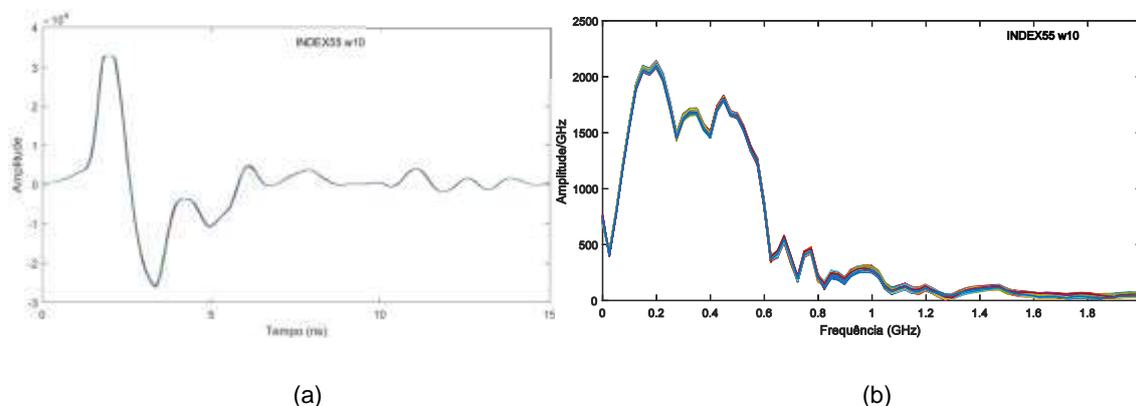


Figura 6.6 Resultados obtidos para o índice de contaminação 55 e $w = 10\%$ com as antenas da IDS: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

Da observação das Figura 6.5 e 6.6, verifica-se no domínio do tempo uma diferença notória não só em termos de amplitude do sinal como também no que diz respeito ao tempo de propagação da onda eletromagnética registada, verificando-se um atraso na amostra com maior índice de contaminação. Relativamente ao domínio da frequência, a principal diferença verifica-se nos valores da amplitude registados entre, aproximadamente, 0,6 e 0,8 GHz. Contudo, os resultados obtidos não são esclarecedores, nesse sentido é necessário um estudo mais aprofundado que permita aferir conclusões mais precisas.

Ainda de destacar que, contrariamente ao que se pensava, nem todas as medições tidas em conta, com as antenas da IDS, se encontravam com a antena suspensa, como se confirma pela observação do sinal no domínio do tempo (ver Anexo II), em que se verifica que a camada correspondente à reflexão do ar não aparece no registo.

In situ

Conforme já referido, os parâmetros adotados antes da realização do ensaio nas duas campanhas em análise não foram os mesmos, o que inviabilizou a sua comparação. De facto, os registos ao serem gravados com características diferentes influenciaram de certa forma a análise em frequência e, por esse motivo, as escalas adotadas também foram diferentes para cada ano.

Assim, apresentam-se de seguida os resultados obtidos para cada secção intervencionada (A, B, C e D) de acordo com cada campanha considerada.

▪ Campanha de 2012

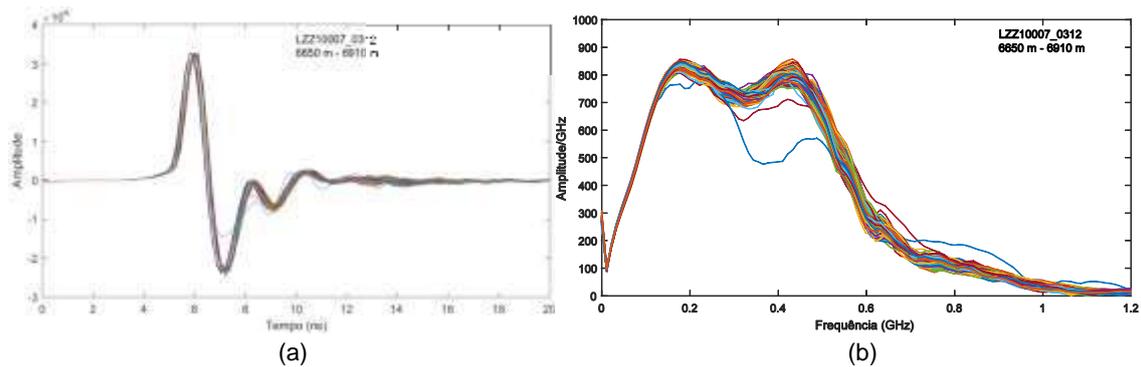


Figura 6.7 Resultados obtidos para a secção A (2012), no domínio do tempo (a) e no domínio da frequência (b)

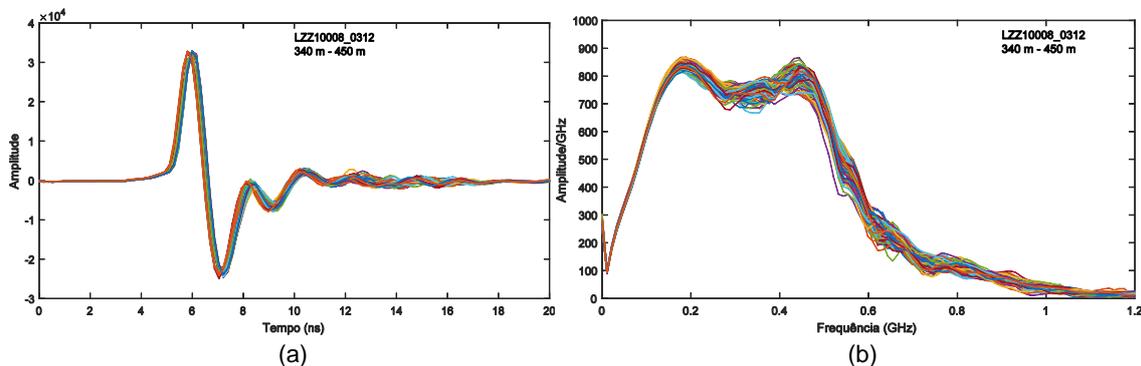


Figura 6.8 Resultados obtidos para a secção B (2012), no domínio do tempo (a) e no domínio da frequência (b)

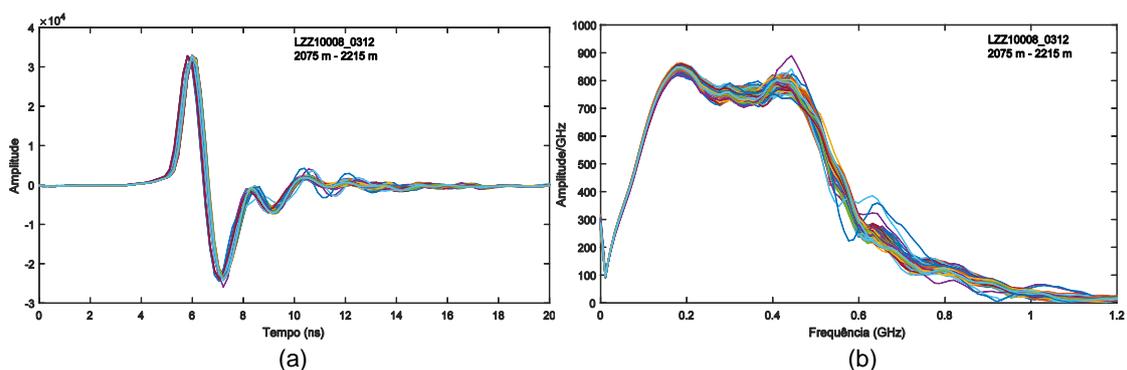


Figura 6.9 Resultados obtidos para a secção C (2012), no domínio do tempo (a) e no domínio da frequência (b)

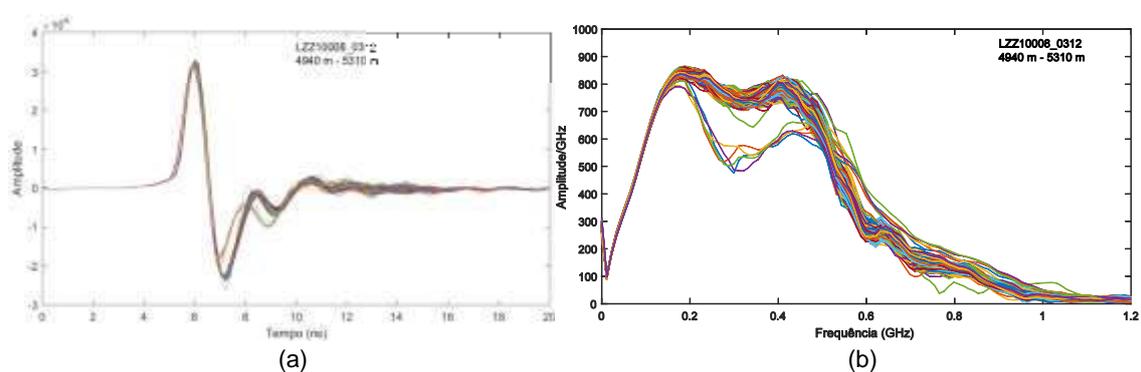


Figura 6.10 Resultados obtidos para a secção D (2012), no domínio do tempo (a) e no domínio da frequência (b)

▪ Campanha de 2015

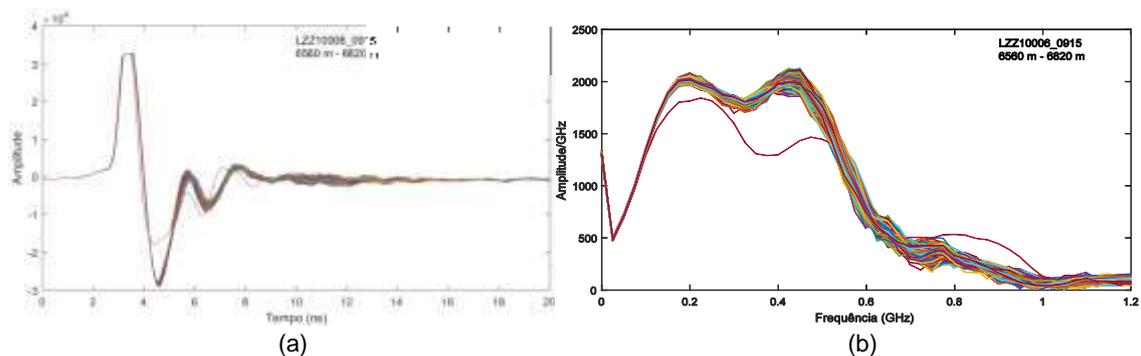


Figura 6.11 Resultados obtidos para a secção A (2015), no domínio do tempo (a) e no domínio da frequência (b)

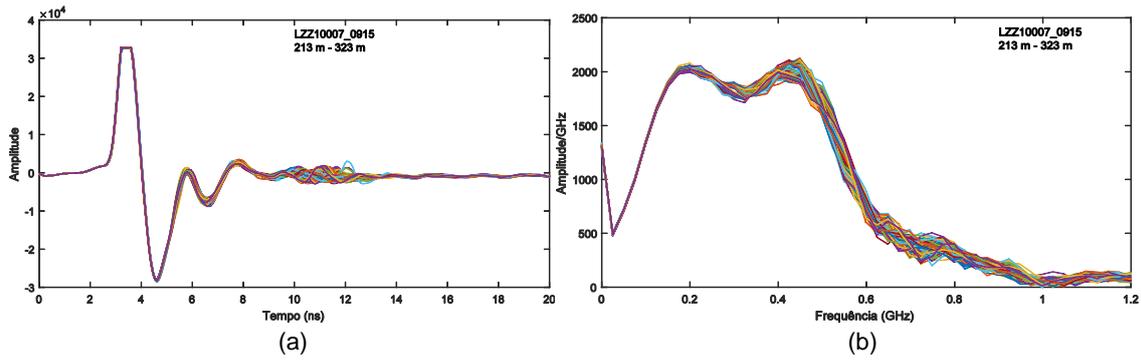


Figura 6.12 Resultados obtidos para a secção B (2015), no domínio do tempo (a) e no domínio da frequência (b)

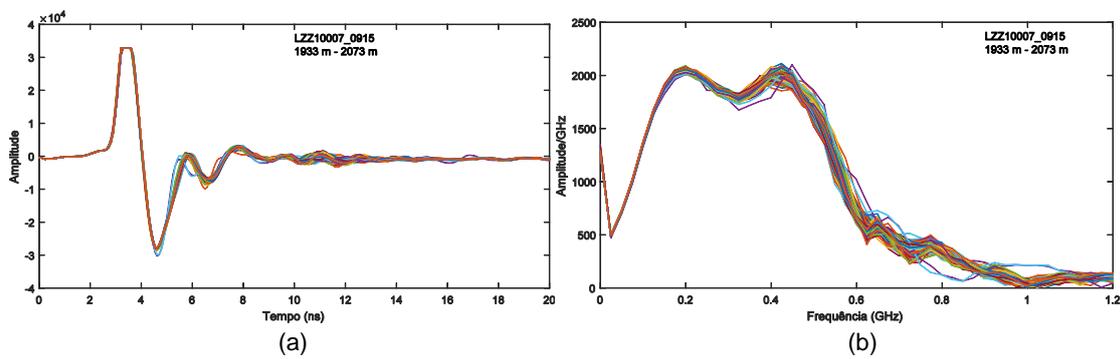


Figura 6.13 Resultados obtidos para a secção C (2015), no domínio do tempo (a) e no domínio da frequência (b)

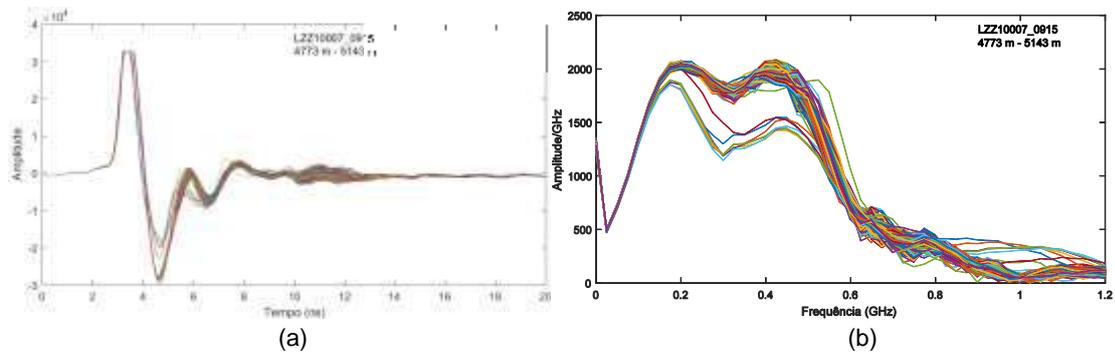


Figura 6.14 Resultados obtidos para a secção D (2015), no domínio do tempo (a) e no domínio da frequência (b)

Segundo os resultados apresentados, são perceptíveis pequenas variações em termos de amplitude, tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência. Observando os resultados da última campanha, verifica-se que, no domínio do tempo, as secções B e D apresentam uma reflexão da última interface mais visível, isto é, com maior amplitude, comparativamente com as outras secções, o que se poderá traduzir numa camada de balastro menos contaminada. Relativamente ao domínio da frequência, a variação mais notória verificou-se no “pico” correspondente à frequência de, sensivelmente, 0,4 GHz.

Assim, uma vez que não foi possível comparar os resultados obtidos antes e após as intervenções, foi necessário recorrer a uma metodologia diferente, metodologia essa que será abordada mais adiante.

É de salientar ainda que a secção E, visto não ter sido alvo de manutenção, os resultados que se apresentam de seguida correspondem a toda a extensão do ficheiro onde esta se insere.

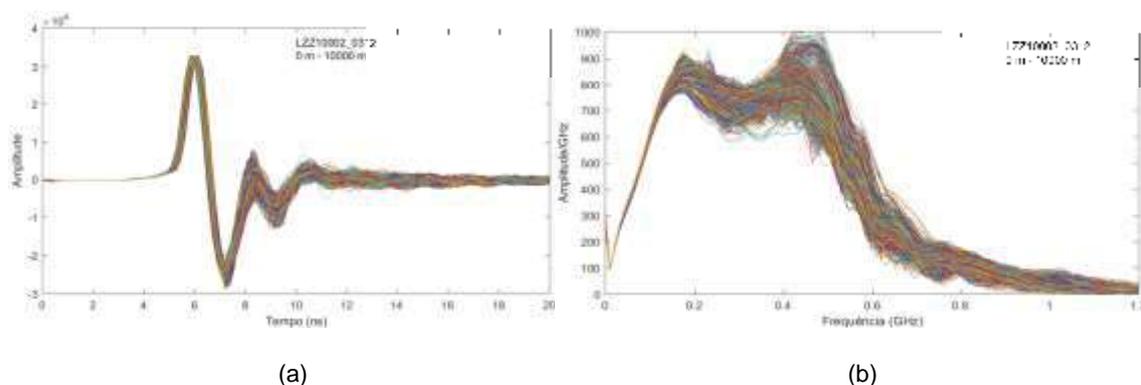


Figura 6.15 Resultados obtidos para a secção E (2012), no domínio do tempo (a) e no domínio da frequência (b)

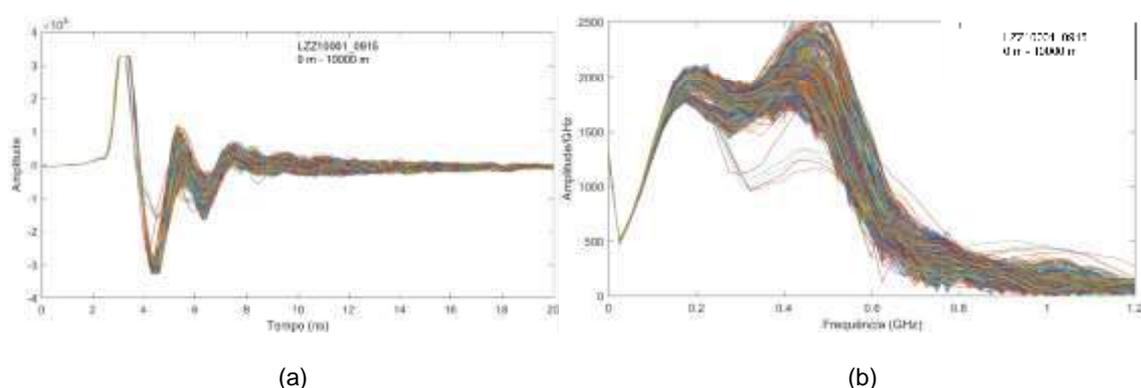


Figura 6.16 Resultados obtidos para a secção E (2015), no domínio do tempo (a) e no domínio da frequência (b)

- Medições com o sistema da GSSI

De modo semelhante às antenas da IDS, apresentam-se também para estas antenas os resultados obtidos para o índice de contaminação 6 com um teor em água de 8% e para o índice de contaminação 55 e teor em água de 10%. Os resultados dos restantes índices de contaminação e respetivos teores em água encontram-se no Anexo II.

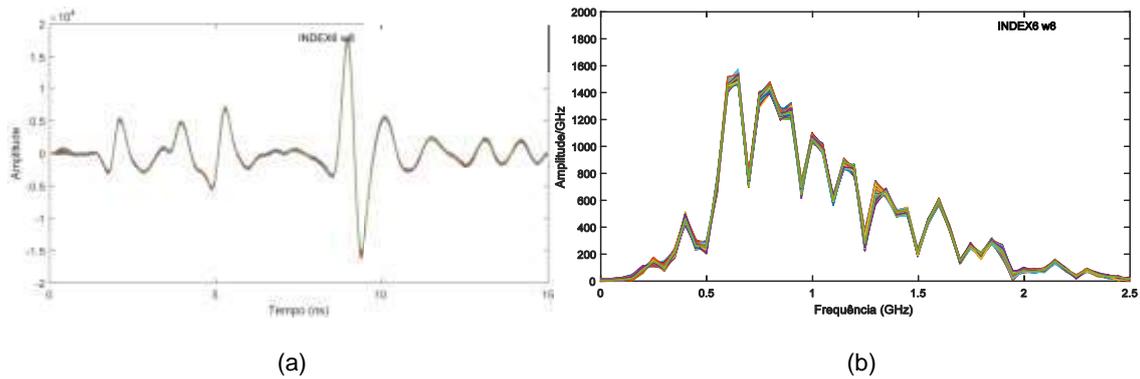


Figura 6.17 Resultados obtidos para o índice de contaminação 6 e $w = 8\%$ com as antenas da GSSI: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

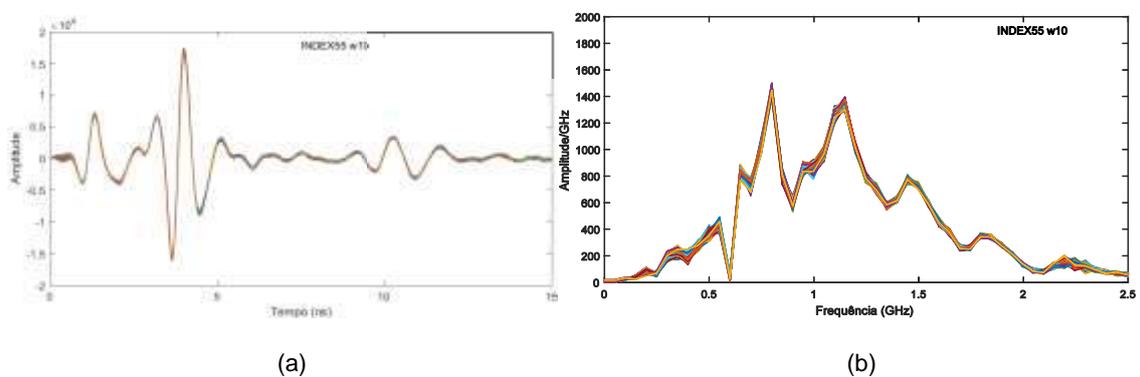


Figura 6.18 Resultados obtidos para o índice de contaminação 55 e $w = 10\%$ com as antenas da GSSI: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

Novamente, o sinal registado no domínio do tempo difere bastante ao comparar-se o índice de contaminação mais baixo com o mais elevado, tanto em termos de amplitude como de tempo de propagação da onda. Para o domínio da frequência, os resultados obtidos foram muitos díspares não se conseguindo retirar conclusões acerca dessa análise, possivelmente devendo-se ao facto de o número de pontos que compõem o sinal não ser em quantidade adequada para a análise que se pretende realizar no domínio da frequência.

Deve-se ainda realçar que as medições *in situ* realizadas com estas antenas não foram alvo de estudo para esta análise no presente trabalho, devido a incompatibilidades entre esses ficheiros e o programa utilizado.

Tendo em conta todas as adversidades e com o intuito de focar numa análise mais pormenorizada, foram apenas objeto de estudo mais aprofundado as amostras levadas a cabo na campanha de 2015. Assim, procedeu-se a diferentes abordagens de forma a detetar eventuais alterações no sinal registado, que irão ser tratadas de seguida.

6.5.3 Análise da amplitude dos “picos” relativos no domínio do tempo

Numa primeira fase, procedeu-se ao estudo da amplitude do sinal no domínio do tempo. Este teve como objetivos não só comparar esses resultados com os das amostras laboratoriais obtidos no capítulo anterior, como também estudar a possibilidade de aplicar o programa desenvolvido para a análise das medições *in situ*. Para esse segundo objetivo, selecionou-se uma das secções intervencionadas e fez-se um estudo mais aprofundado na tentativa de implementar esses conhecimentos para as medições em campo.

Na Figura 6.19, encontra-se representado o sinal eletromagnético obtido para o índice de contaminação 55 e com teor em água de 10%, registado pelos dois sistemas de radar, servindo de exemplificação para o método adotado na leitura da amplitude da base da amostra, última interface.

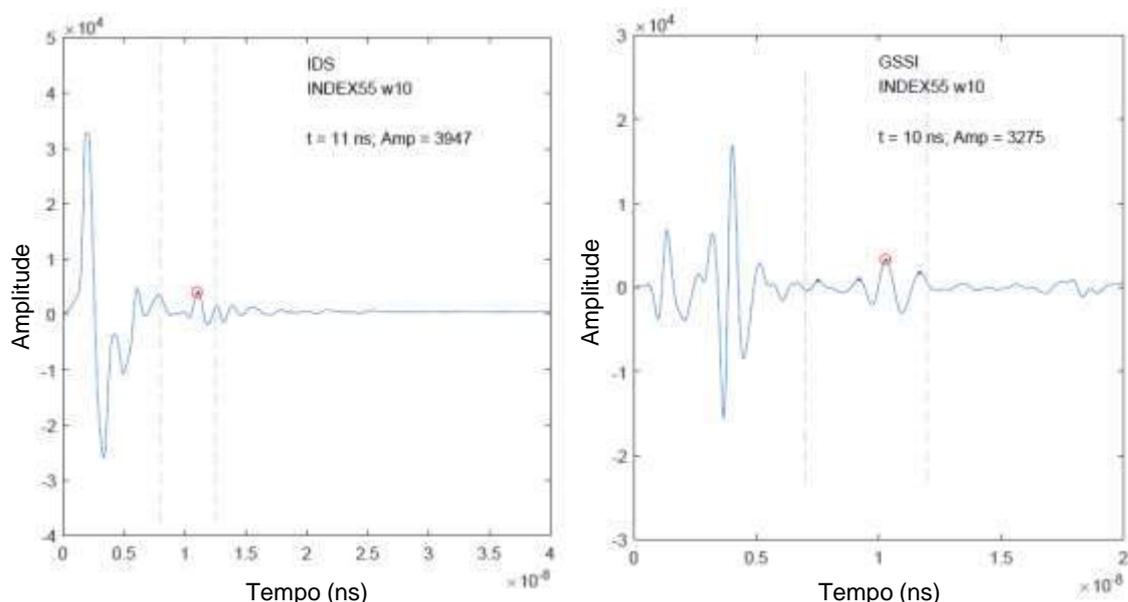


Figura 6.19 Exemplificação da leitura de amplitudes no domínio do tempo, com as antenas da IDS (a) e com as antenas da GSSI (b)

A adoção de escalas horizontais diferentes assenta no facto de, na Figura 6.19, se apresentarem os sinais de origem, ou seja, com a respetiva janela de amostragem definida aquando da realização do ensaio (ver Tabela 5.5).

Os resultados obtidos para as restantes amostras laboratoriais, encontram-se esquematizados nas Figura 6.20 e Figura 6.21, de acordo com o sistema de radar considerado.

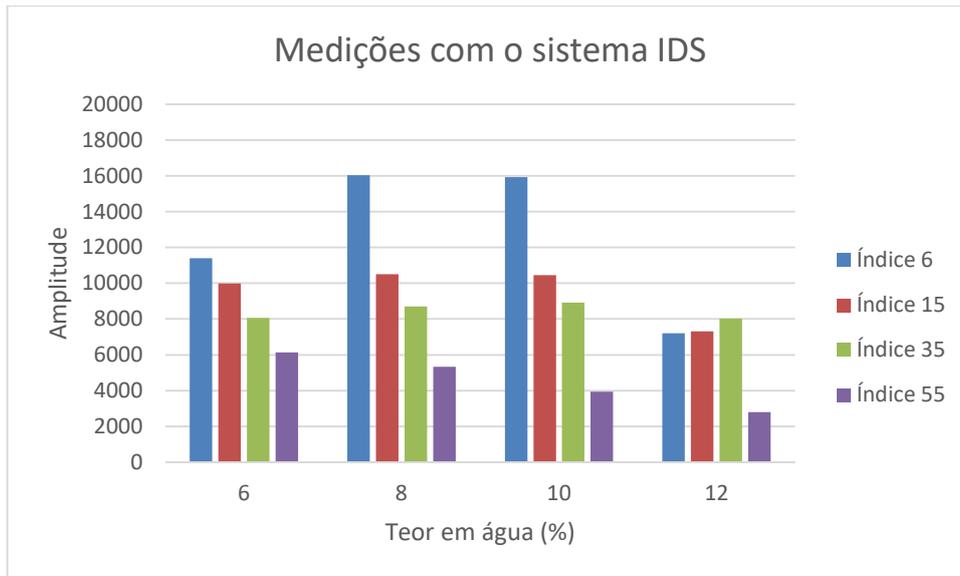


Figura 6.20 Resultados obtidos, para as amostras laboratoriais, da amplitude do sinal com as antenas de 400 MHz

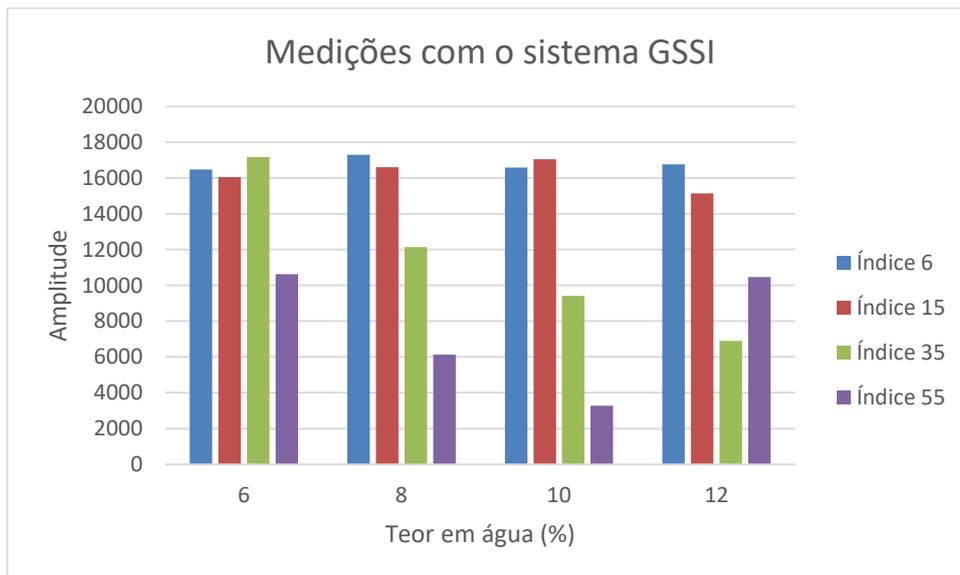


Figura 6.21 Resultados obtidos, para as amostras laboratoriais, da amplitude do sinal com as antenas de 1 GHz

Observa-se assim que os resultados obtidos pelo programa de cálculo numérico são bastante idênticos aos observados na leitura feita recorrendo programa de interpretação utilizado no capítulo anterior, resultados já demonstrados em 5.5.2. Desta forma, é possível utilizar o programa desenvolvido no âmbito deste trabalho para a interpretação dos resultados obtidos com o radar com confiança, no domínio do tempo, salientando a rapidez do processamento.

De seguida foram analisados os resultados obtidos em campo. Assim, recorreu-se ao mesmo procedimento para analisar a variação da amplitude do sinal na secção D. Neste caso, uma vez que as medições não são estáticas, a amplitude varia constantemente ao longo de toda a secção,

tendo-se optado por fazer a análise da mediana de 60 em 60 m, contendo troços antes e após a secção intervencionada. Os resultados obtidos para esta situação, apresentam-se na Figura 6.22, onde se encontra delimitada a secção que foi reabilitada. De esclarecer que os resultados que se apresentam de seguida dizem respeito apenas à campanha de 2015 e, tal como já referido, encontram-se adaptados por questões de sigilo; assim sendo, os pontos quilométricos considerados são relativos à origem do trecho em análise.

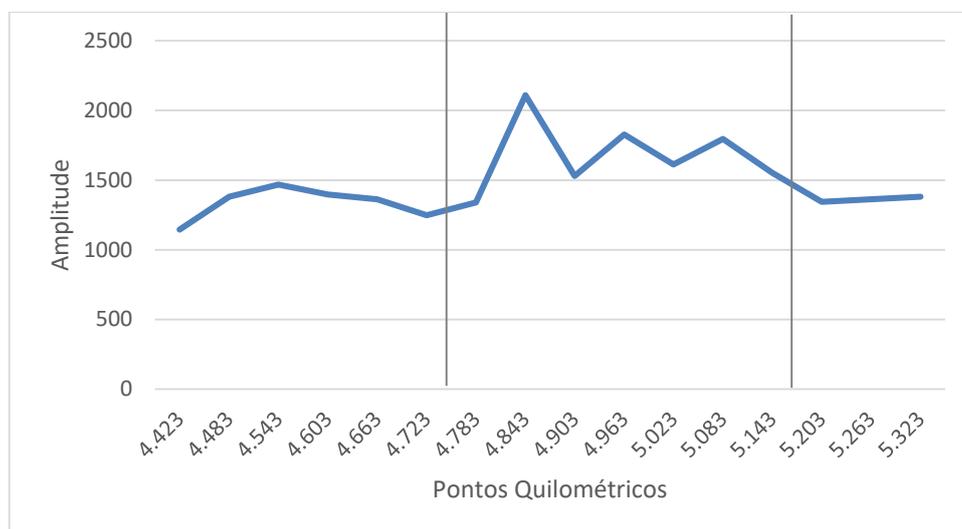


Figura 6.22 Resultados obtidos, para a Secção D, da amplitude do sinal no domínio do tempo

Da Figura 6.22, observa-se que a secção que foi intervencionada corresponde ao troço que apresenta as amplitudes maiores comparativamente aos restantes troços em que não houve manutenção. Foi ainda igualmente analisado, o tempo de propagação associado ao sinal com as amplitudes apresentadas anteriormente, na tentativa de averiguar possíveis alterações nesta grandeza. Os resultados obtidos encontram-se representados na Figura 6.23.

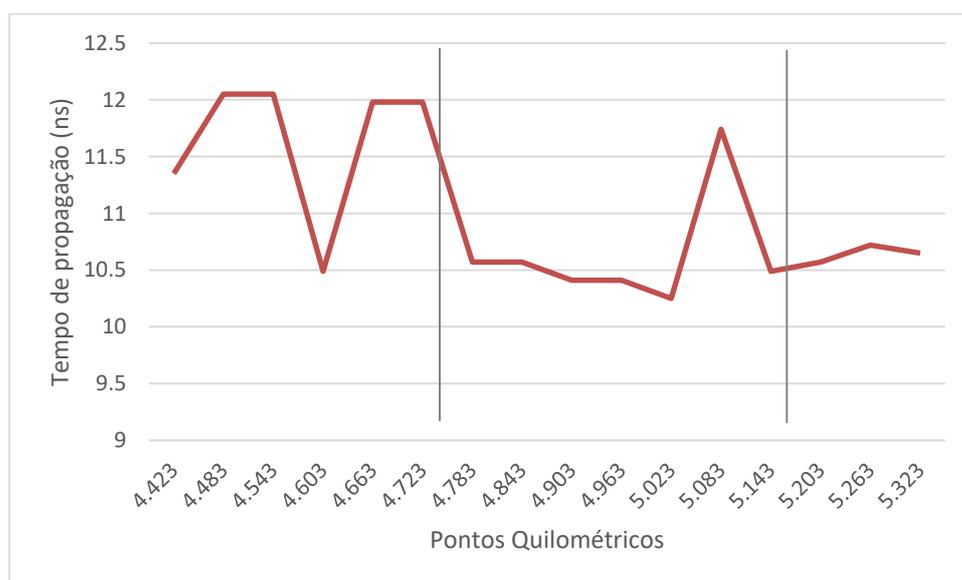


Figura 6.23 Resultados obtidos, para a Secção D, do tempo de propagação da onda

Dos resultados apresentados, observa-se que o tempo de propagação na secção D tende para os 10,5 ns, embora atinja excepcionalmente valores superiores. Estes resultados são coerentes com a Figura 6.22, na medida em que amplitudes maiores estão associadas a um menor tempo de propagação do sinal.

6.5.4 Análises no domínio da frequência

Focando agora a análise para o domínio da frequência, como já referido, estudou-se apenas minuciosamente os dados obtidos *in situ* com as antenas da IDS e com base somente nos ficheiros mais atuais. Fizeram-se, assim, três abordagens diferentes de forma a efetuar-se um estudo mais pormenorizado de cada secção, facilitando deste modo a identificação da variabilidade de determinadas características, possibilitando mais certezas acerca da condição da camada de balastro nesses troços.

Foi ainda necessário dividir esta análise em duas fases, a primeira diz respeito ao seguimento da análise anterior, em que se focou apenas na secção D e o estudo realizado teve por base a análise da mediana feita ao longo de 60 m. A segunda fase correspondeu à seleção dos parâmetros que foram mais evidentes na Fase I, com o intuito de exportar esse conhecimento para ficheiros mais abrangentes, analisando assim mais secções.

Fase I

Deste modo, optou-se por analisar primeiramente os máximos e os mínimos das amplitudes dos “picos” registados, assim como os valores de frequência que lhes estão associados. Por fim, ainda se analisou a variação de algumas dessas amplitudes em relação a outras.

Como forma de facilitar a compreensão da metodologia adotada, demonstra-se na Figura 6.24 os parâmetros analisados nesta fase inicial.

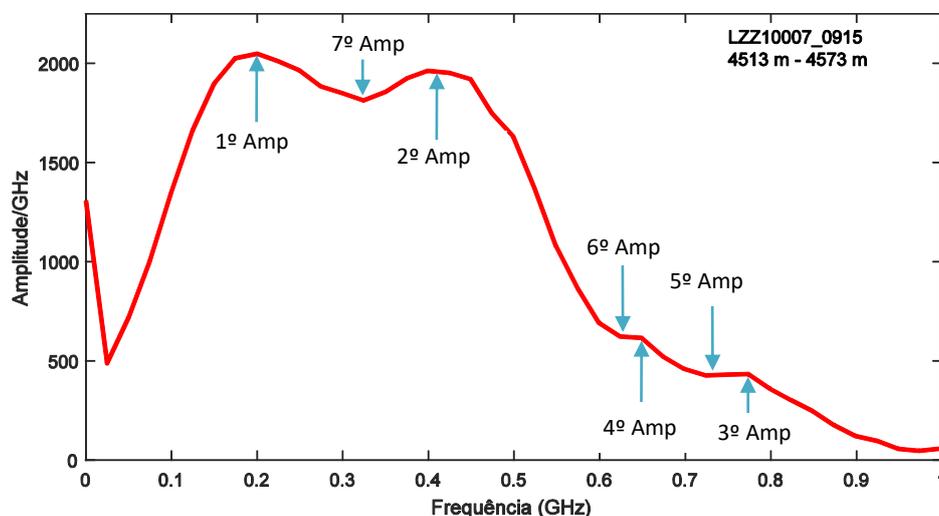


Figura 6.24 Parâmetros tidos em consideração na Fase I

Apresentam-se de seguida, nas Figura 6.25 e Figura 6.26, os resultados obtidos para as amplitudes máximas e mínimas registadas. O troço correspondente à secção D encontra-se também identificado nessas mesmas figuras.

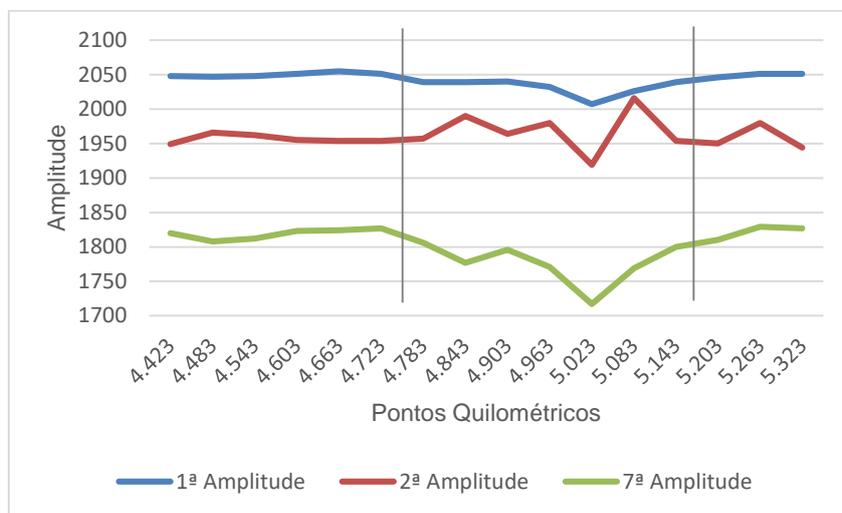


Figura 6.25 Resultados obtidos no domínio da frequência, para a Secção D, das amplitudes 1, 2 e 7

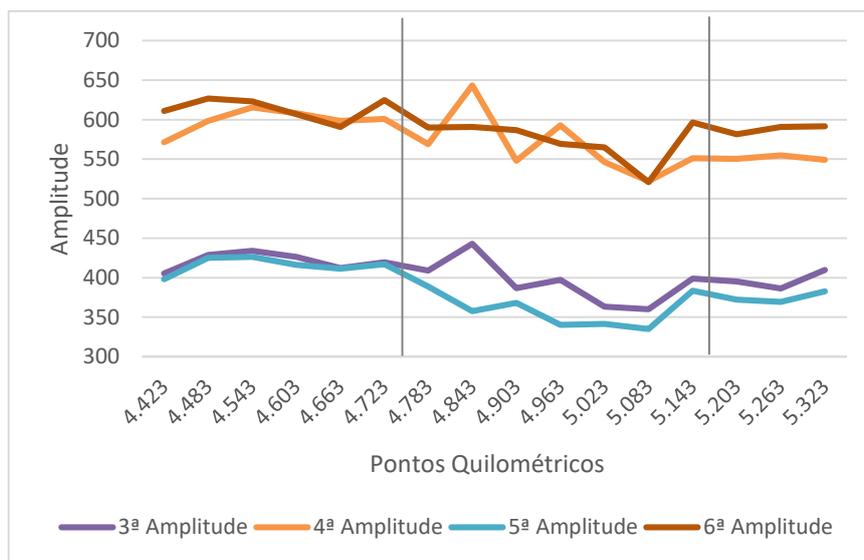


Figura 6.26 Resultados obtidos no domínio da frequência, para a Secção D, das amplitudes 3, 4, 5 e 6

Da observação dos gráficos, verifica-se que as diferenças mais notórias observadas na secção que foi intervencionada dizem respeito às amplitudes 2, 5 e 7; em que se verificou, particularmente nessa secção, um aumento da primeira e uma diminuição das duas últimas.

Nas Figura 6.27 e Figura 6.28, demonstram-se os resultados obtidos para as frequências associadas às amplitudes máximas e mínimas anteriores.

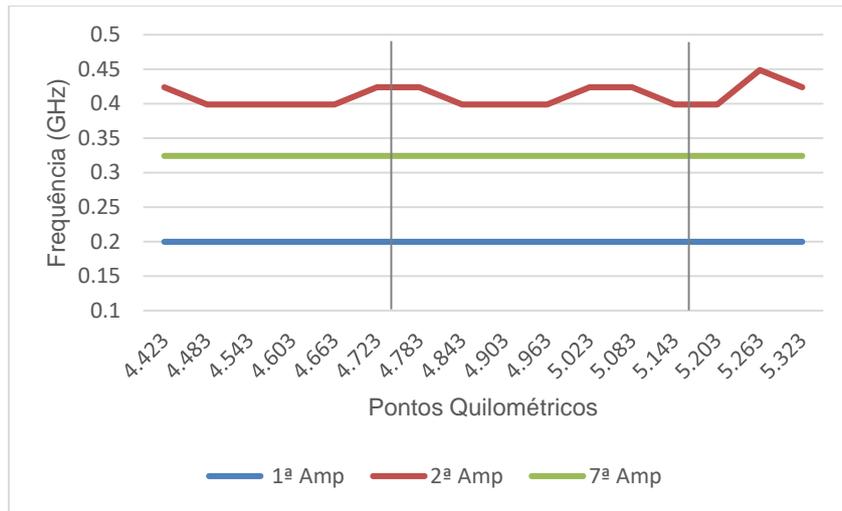


Figura 6.27 Resultados obtidos para a frequência das amplitudes 1, 2 e 7

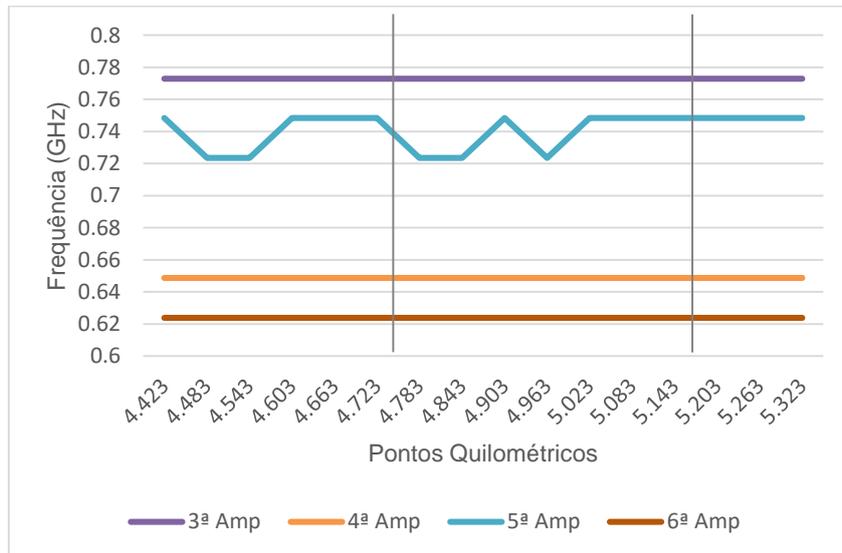


Figura 6.28 Resultados obtidos para a frequência das amplitudes 3, 4, 5 e 6

De acordo com os resultados obtidos, percebeu-se que o valor da frequência associado aos “picos” máximos e mínimos praticamente não variou, apenas excepcionalmente a segunda e quinta amplitudes apresentaram outros valores, não sendo, por esse motivo, relevantes para o estudo em questão. Ainda assim, é importante referir que devido ao limitado número de pontos do sinal para cada perfil não se obteve a resolução mais indicada do eixo das frequências para este tipo de análise.

Como referido inicialmente, analisou-se ainda a variação de algumas amplitudes relativamente a outras, resultados que se apresentam na Figura 6.29.

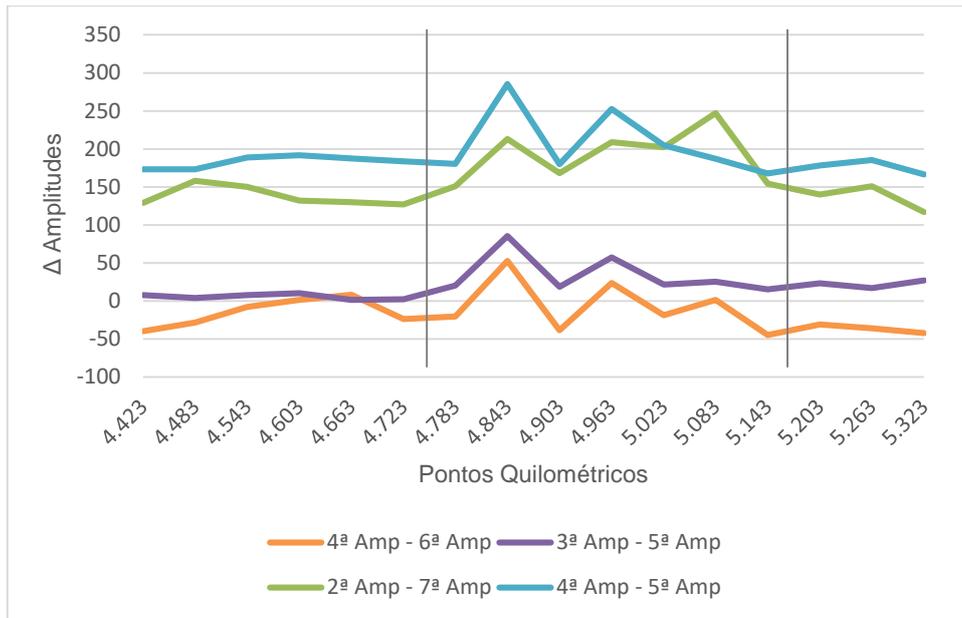


Figura 6.29 Variação de amplitudes em função de Pk

Tendo em conta os resultados obtidos para a variação das amplitudes, é perceptível que praticamente todas elas apresentam uma variação mais significativa na zona intervencionada; em que o aumento das amplitudes máximas se traduz na diminuição das mínimas, evidenciando-se por isso aqueles “picos” na figura anterior.

Fase II

Posto isto, os parâmetros que mostraram melhores resultados e que se tornaram o foco principal numa segunda fase de análise apresentam-se na Figura 6.30.

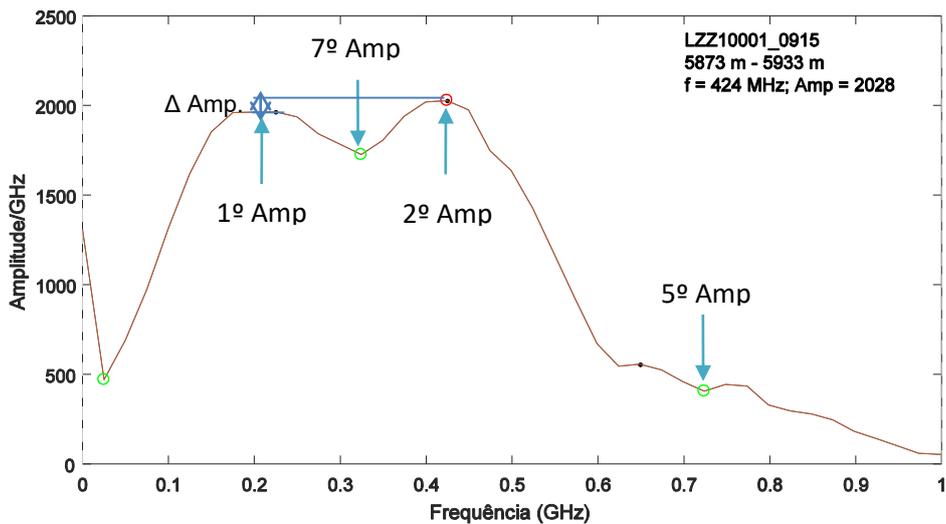


Figura 6.30 Parâmetros que foram alvo de estudo na Fase II

Neste sentido, as três abordagens consideradas dizem respeito a: i) leitura de amplitudes em pontos específicos definidos *a priori*; ii) análise da variação de duas amplitudes pré-definidas e iii) análise do declive de um trecho do gráfico. Abordagens e resultados que se apresentam de seguida.

De salientar que os resultados obtidos para a análise da frequência em função do Pk não foram muito explícitos e por esse motivo não se prosseguiu com esse estudo. A última abordagem feita diz respeito ao declive da recta definida pelos pontos da segunda e sétima amplitudes, análise que não tinha sido feita anteriormente.

Para a Fase II, uma vez que exige um estudo mais cuidadoso e pormenorizado, seleccionaram-se duas secções das que foram anteriormente analisadas (secções E e D). Nessas secções ainda se definiram novos trechos para uma abordagem mais especializada (ver Figura 6.31 e Figura 6.32).

Tendo em conta que a secção E não apresenta nenhum trecho que tenha sido sujeito a ações de manutenção, optou-se por seleccionar quatro trechos com 60 m cada que foram denominados por E1, E2, E3 e E4. Estas secções correspondem a áreas que se apresentam mais uniformes no radargrama, isto é, em que não se verificaram grandes variações que poderiam, de certa forma, condicionar os resultados, obtendo-se assim secções homogéneas na análise do radargrama.

Destas novas secções sabe-se que as primeiras (E1 e E2) são compostas por travessas do tipo bibloco enquanto as últimas (E3 e E4) apresentam travessas de madeira. A Figura 6.31 sugere ainda que E1 e E2 correspondem a secções antes do túnel e E3 e E4 a secções no interior do túnel.

De forma semelhante, fez-se esta abordagem para a secção D, no entanto, neste caso, definiram-se trechos com 100 m cada; em que um coincide com a zona intervencionada (secção D1) e outro fora dessa zona de intervenção (secção D2). Estes dados encontram-se esquematizados na Figura 6.32.

É ainda importante referir que os resultados obtidos para todas estas novas secções, tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência, após a aplicação da FFT, se encontram representados no Anexo II.

De seguida, apresentam-se então os resultados obtidos provenientes das seguintes análises:

- i) Análise da 5ª e 7ª amplitudes
- ii) Análise da variação de amplitude da 1ª para a 2ª
- iii) Análise do declive definido pelos pontos de amplitude 2 e 7

Destaca-se ainda que em todas as análises efetuadas, optou-se por definir uma linha de tendência que traduz a média móvel ao longo de 250 pontos, com o intuito de facilitar a visualização de mudanças bruscas nos parâmetros analisados.

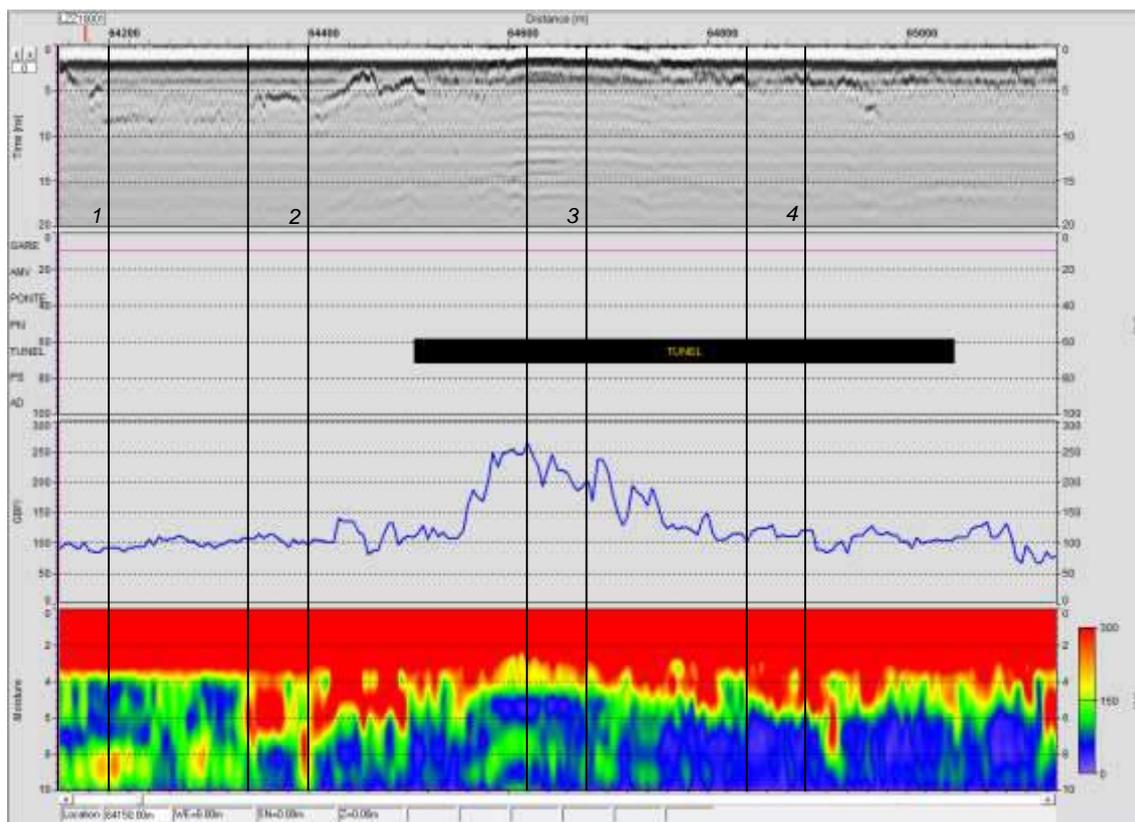


Figura 6.31 Definição de novas secções, E1, E2, E3 e E4, respetivamente

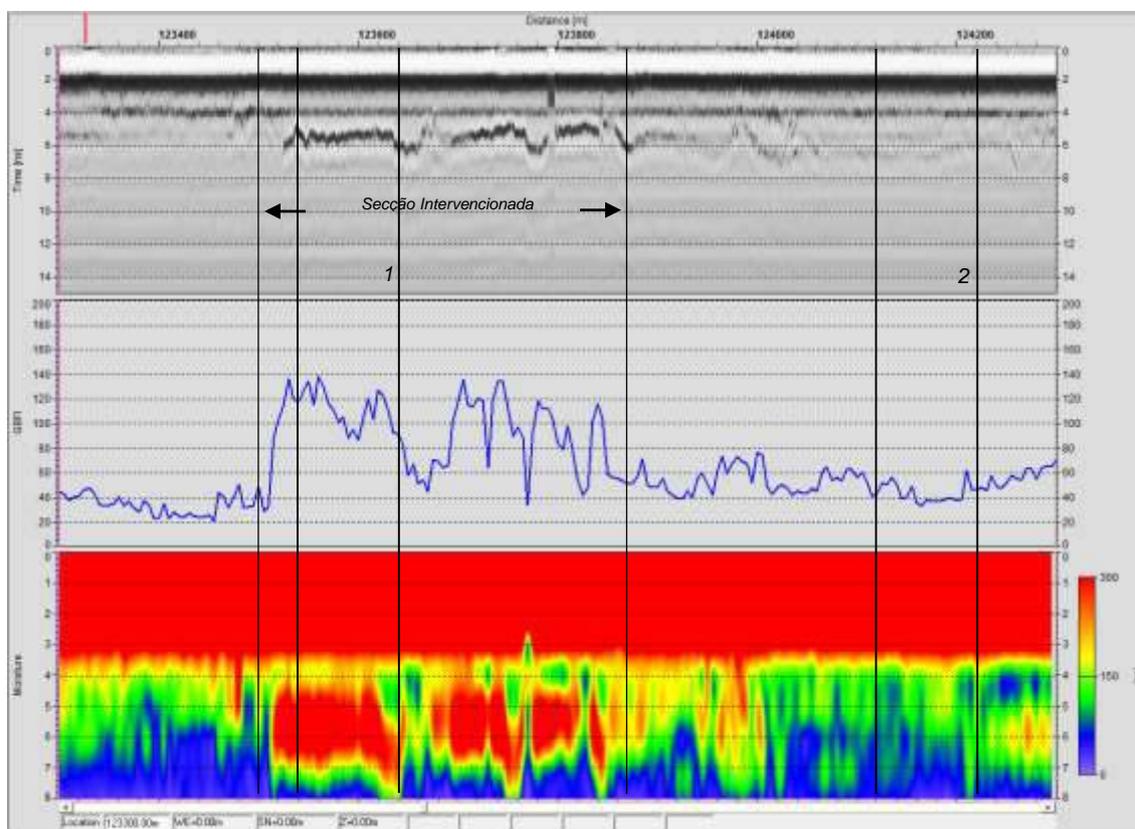


Figura 6.32 Definição de novas secções, D1 e D2, respetivamente

i) Análise da 5ª e 7ª amplitudes

- Seções E1, E2, E3 e E4

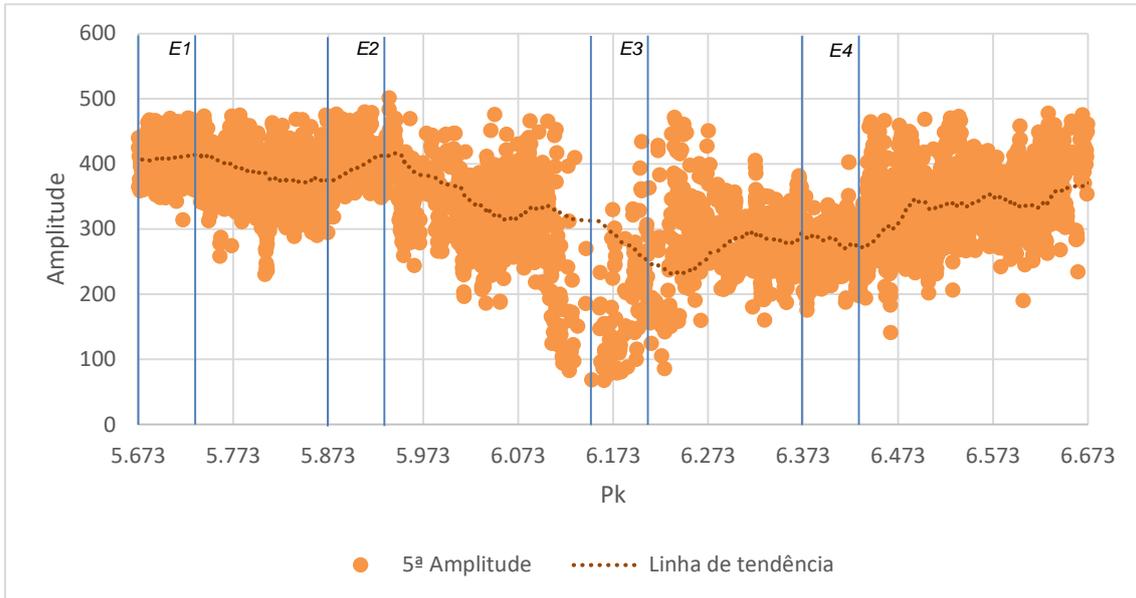


Figura 6.33 Resultados obtidos para as seções E1, E2, E3 e E4 da 5ª amplitude ao longo de 1000 m

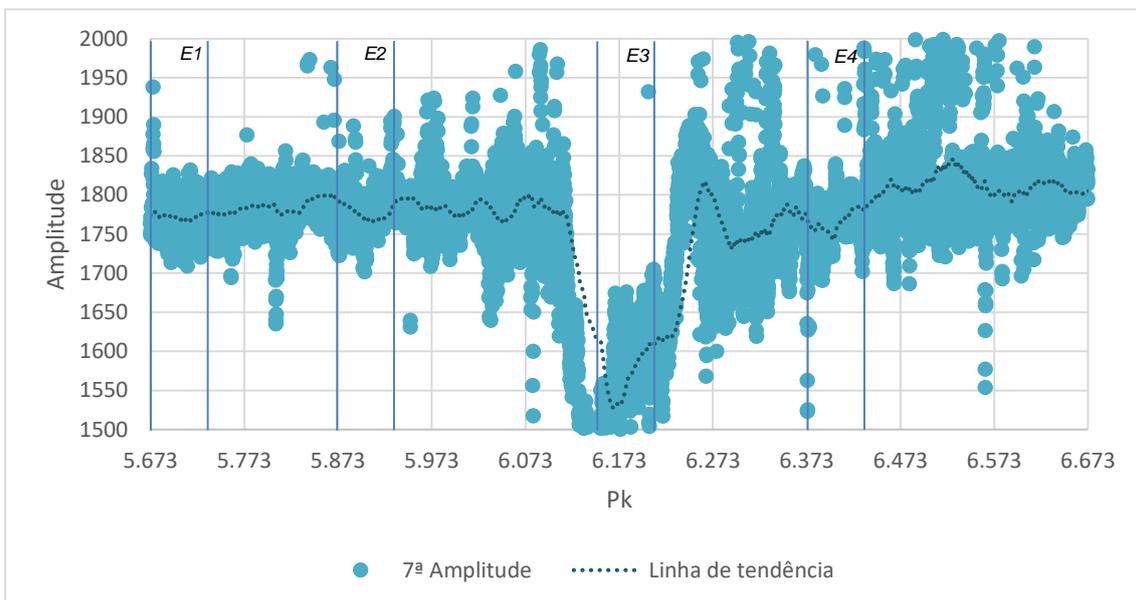


Figura 6.34 Resultados obtidos para as seções E1, E2, E3 e E4 da 7ª amplitude ao longo de 1000 m

▪ Secções D1 e D2

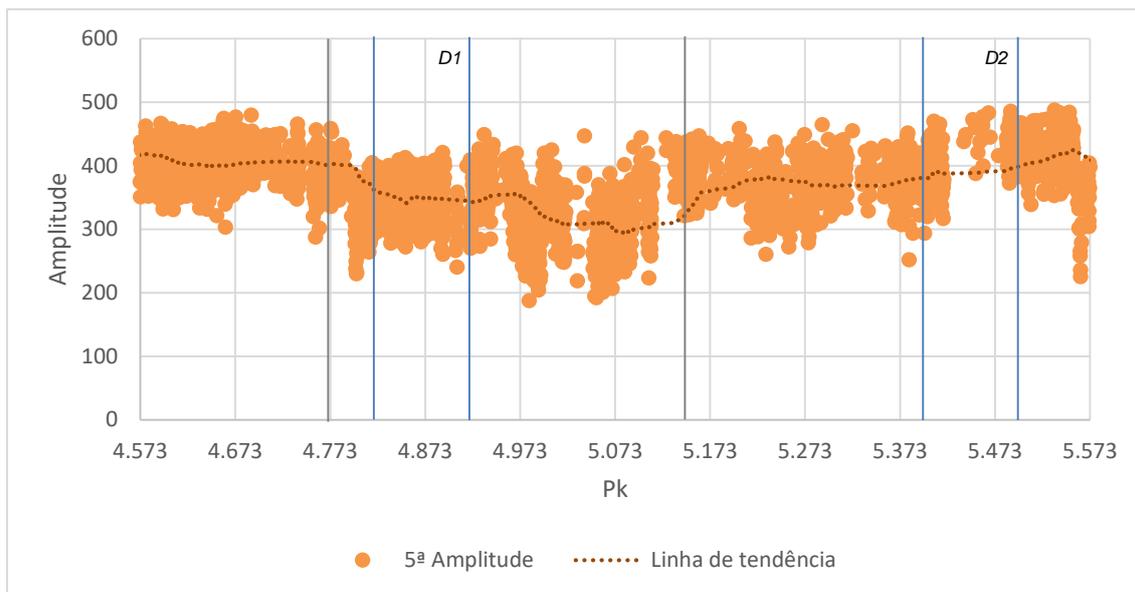


Figura 6.35 Resultados obtidos para as secções D1 e D2 da 5ª amplitude ao longo de 1000 m

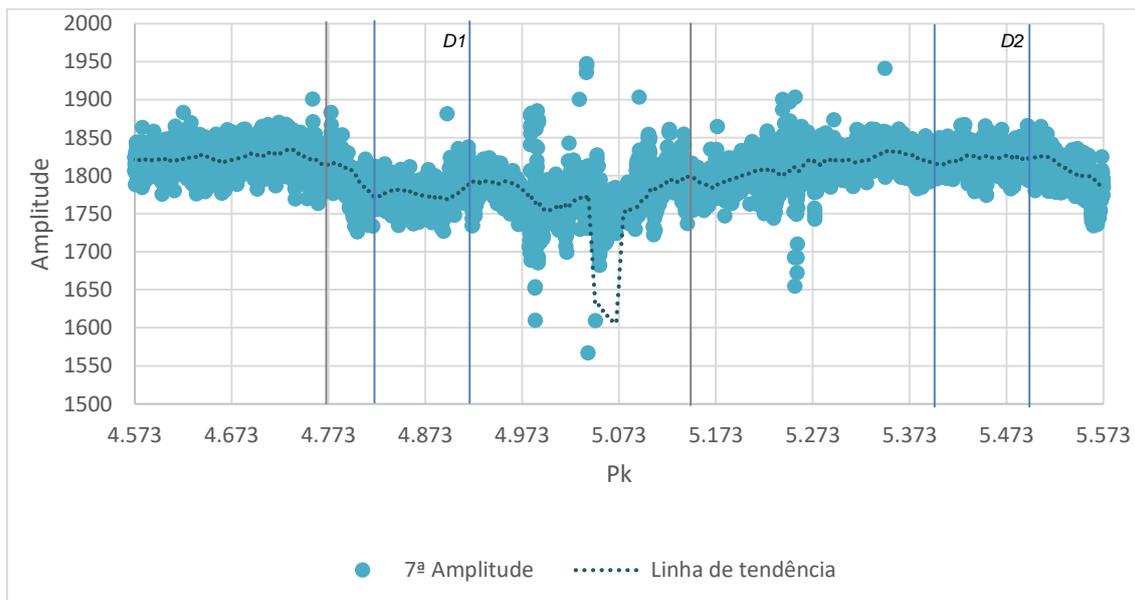


Figura 6.36 Resultados obtidos para as secções D1 e D2 da 7ª amplitude ao longo de 1000 m

Da observação dos resultados anteriores, verificou-se que no caso da secção E foi mais notório para a secção E3 em que houve uma diminuição das duas amplitudes estudadas, sendo que foi mais acentuada para a 7ª amplitude. Comparando a secção E4 com as secções E1 e E2, verificou-se que a primeira, que é composta por travessas de madeira, apresenta valores na 5ª amplitude inferiores a 300 enquanto as outras, compostas por travessas do tipo bibloco, a amplitude é da ordem dos 400. Para as secções D1 e D2 observaram-se resultados bastante semelhantes em ambas as amplitudes, não se conseguindo identificar diferenças significativas.

ii) Análise da variação de amplitude da 1ª para a 2ª

▪ Secções E1, E2, E3 e E4

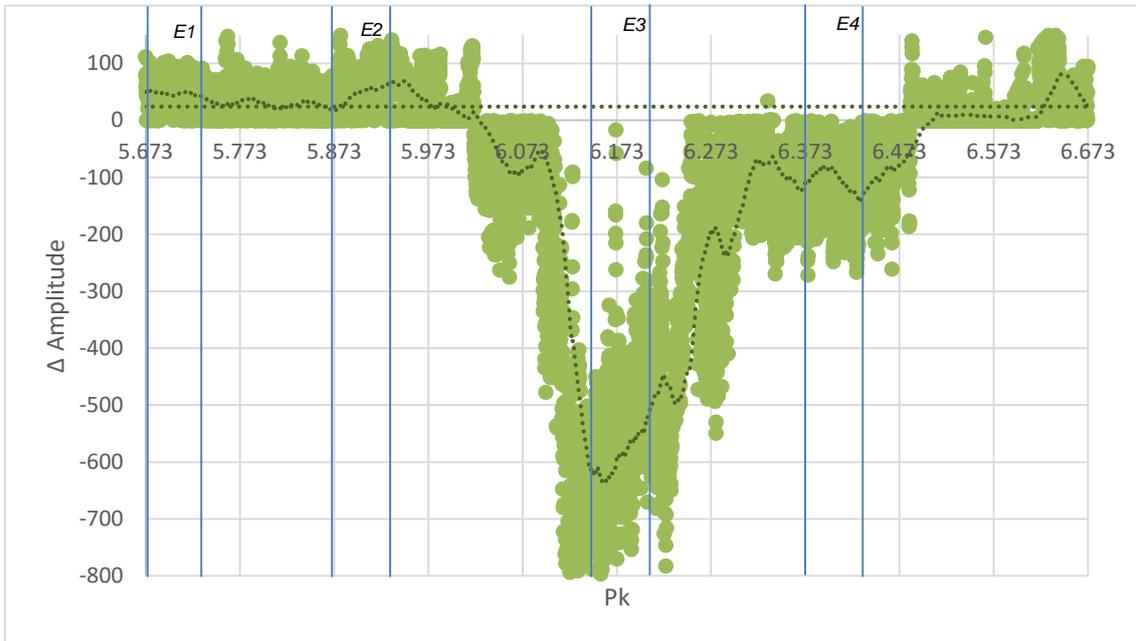


Figura 6.37 Resultados obtidos para as secções E1, E2, E3 e E4 da variação da 1ª amplitude com a 2ª amplitude ao longo de 1000 m

▪ Secções D1 e D2

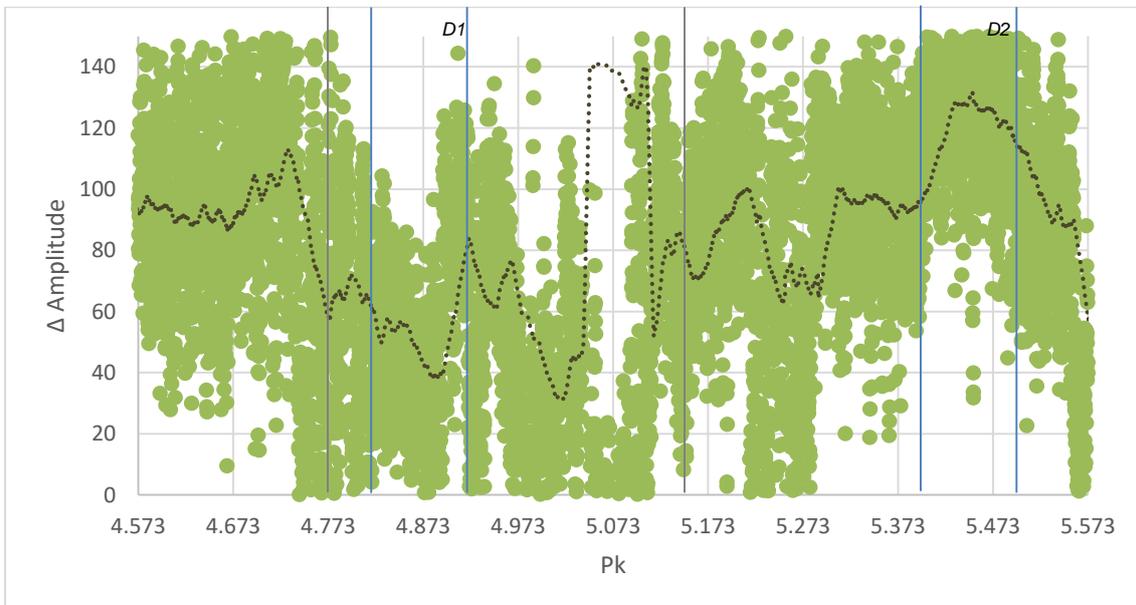


Figura 6.38 Resultados obtidos para as secções D1 e D2 da variação da 1ª amplitude com a 2ª amplitude ao longo de 1000 m

Da observação dos resultados relativamente à variação das amplitudes pré-definidas, verificou-se que estes foram substancialmente diferentes quando comparadas as duas secções escolhidas para análise (E e D). Por um lado, é visível que na zona correspondente ao túnel o valor da 2ª amplitude é consideravelmente superior, o que conduz à variação negativa observada no gráfico. Esse resultado também pode ser observado no Anexo II onde se analisaram, no domínio da frequência, as quatro secções pertencentes à secção E. Por outro lado, observando as secções D1 e D2 é perceptível que a secção correspondente à zona não intervencionada apresenta um valor, sensivelmente, três vezes superior à da zona que foi sujeita a intervenção.

Verifica-se ainda na Figura 6.38, uma variação atípica deste parâmetro, chegando a atingir 140 na variação da 1ª amplitude para a 2ª, fenómeno verificado devido à presença de uma passagem de nível seguida de uma gare naquele trecho.

iii) Análise do declive definido pelos pontos de amplitude 2 e 7

- Secções E1, E2, E3 e E4

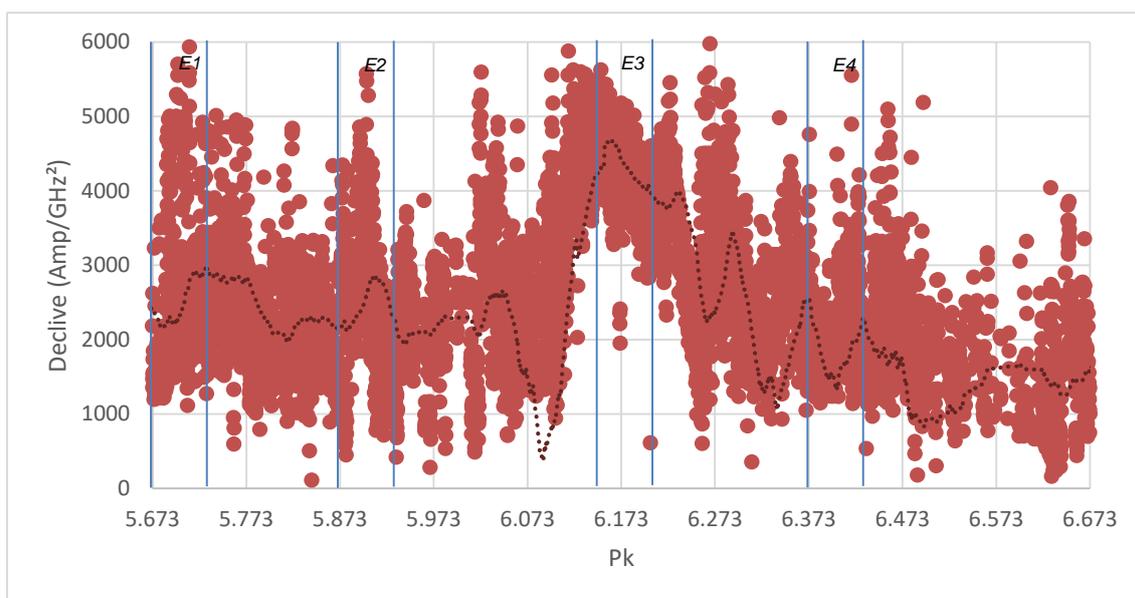


Figura 6.39 Resultados obtidos para as secções E1, E2, E3 e E4 do declive ao longo de 1000 m

A fórmula subjacente a esta análise consistiu na aplicação da seguinte expressão (ver Figura 6.24):

$$\text{declive} = \frac{2^{\text{a}} \text{ Amplitude} - 7^{\text{a}} \text{ Amplitude}}{2^{\text{a}} \text{ frequência} - 7^{\text{a}} \text{ frequência}}$$

- Secções D1 e D2

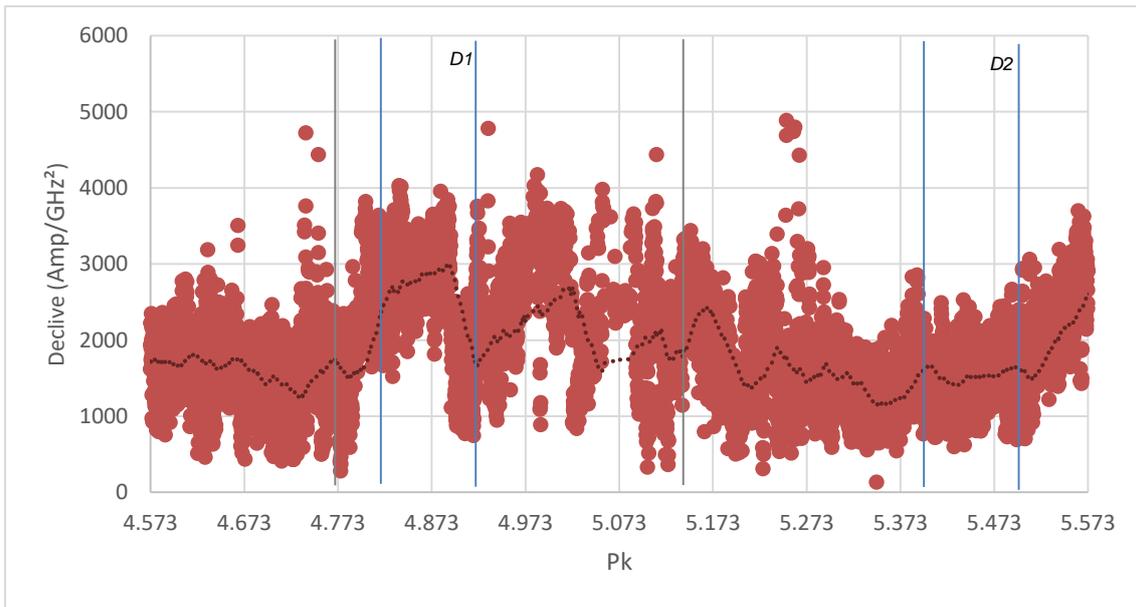


Figura 6.40 Resultados obtidos para as secções D1 e D2 do declive ao longo de 1000 m

Observando os resultados obtidos para as secções E1, E2, E3 e E4, verifica-se que efetivamente o declive da secção E3 é o mais significativo quando comparado com as outras secções. Ainda de notar que a secção E4 apresenta o declive menor (inferior a 2000).

A Figura 6.40 sugere que a secção que foi intervencionada apresente um declive superior comparativamente a uma secção não intervencionada, o que significa que através deste parâmetro é possível identificar camadas de apoio que se encontram em condições diferentes.

De salientar ainda que em todas as análises efetuadas verificou-se, em alguns troços, que o número de pontos provenientes da leitura dos “picos” não foi o mesmo, devendo-se ao facto do algoritmo de procura de “picos” não ter tido bom desempenho nessas secções.

Por fim, avaliou-se ainda os 10 km onde as secções B, C e D se inserem, permitindo perceber a variação destes parâmetros ao longo de um troço mais extenso e na tentativa de apurar qual das abordagens é mais influente. Assim, apresentam-se de seguida em dois gráficos separados os resultados daí obtidos, tendo-se reajustado a escala conforme os parâmetros em análise.

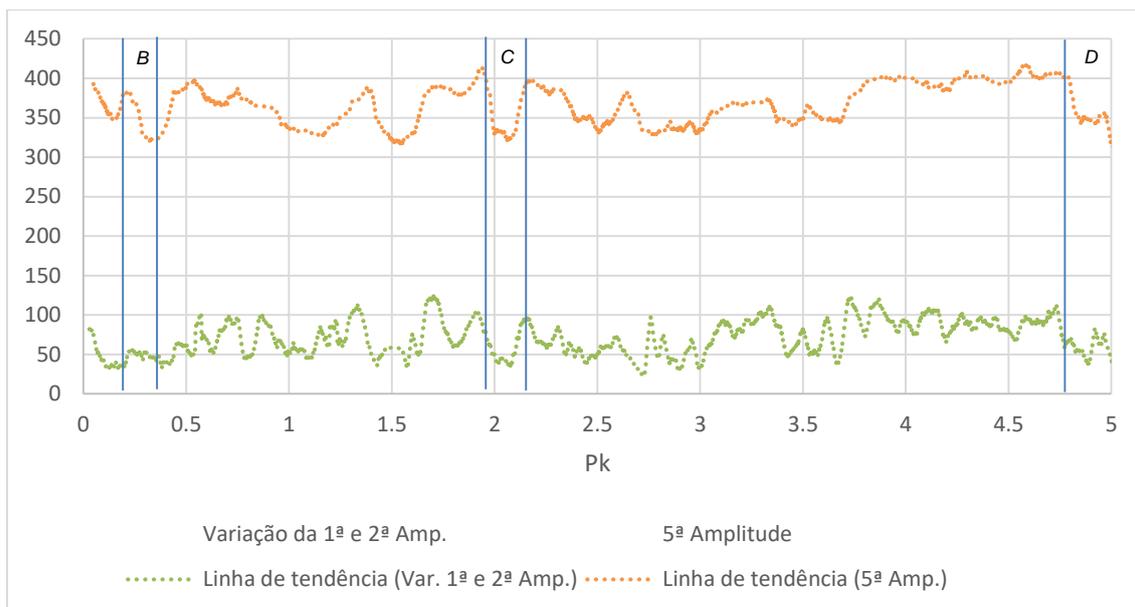


Figura 6.41 Resultados obtidos para $\Delta 1^a$ amp.- 2^a amp. e para a 5^a amplitude ao longo dos primeiros 5 km

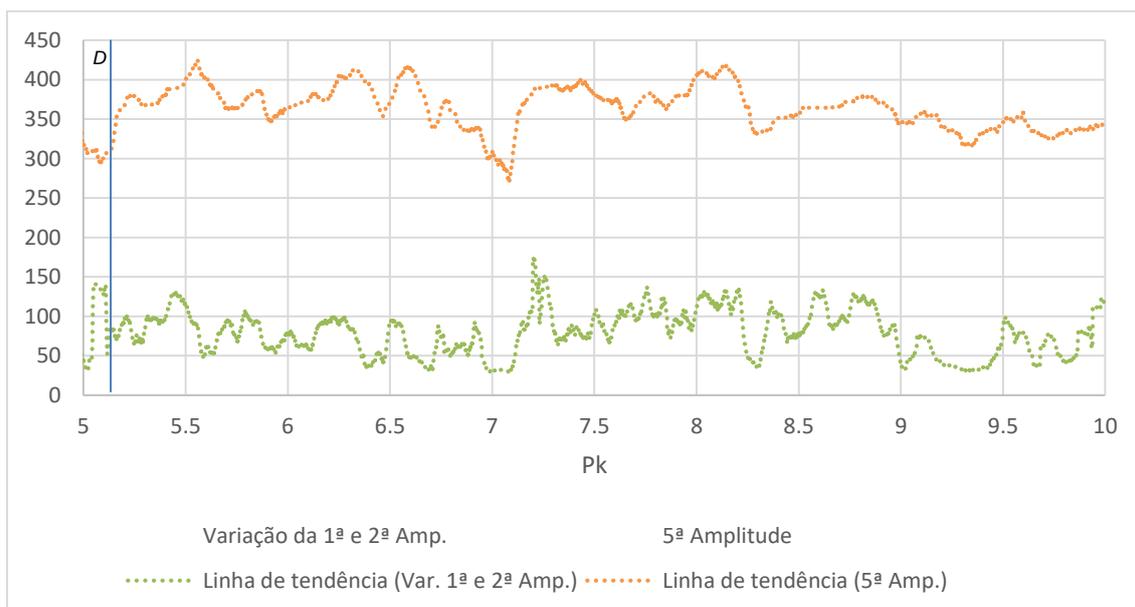


Figura 6.42 Resultados obtidos para $\Delta 1^a$ amp.- 2^a amp. e para a 5^a amplitude ao longo dos últimos 5 km

Da observação das Figuras 6.41 e 6.42, verifica-se que as secções que foram alvo de manutenção apresentam valores constantemente inferiores, tanto da 5^a amplitude como da variação entre a 1^a e a 2^a amplitudes, quando comparadas com as outras secções não intervencionadas. Resultado que poderá indiciar as condições a que se encontram as camadas de apoio nesses troços.

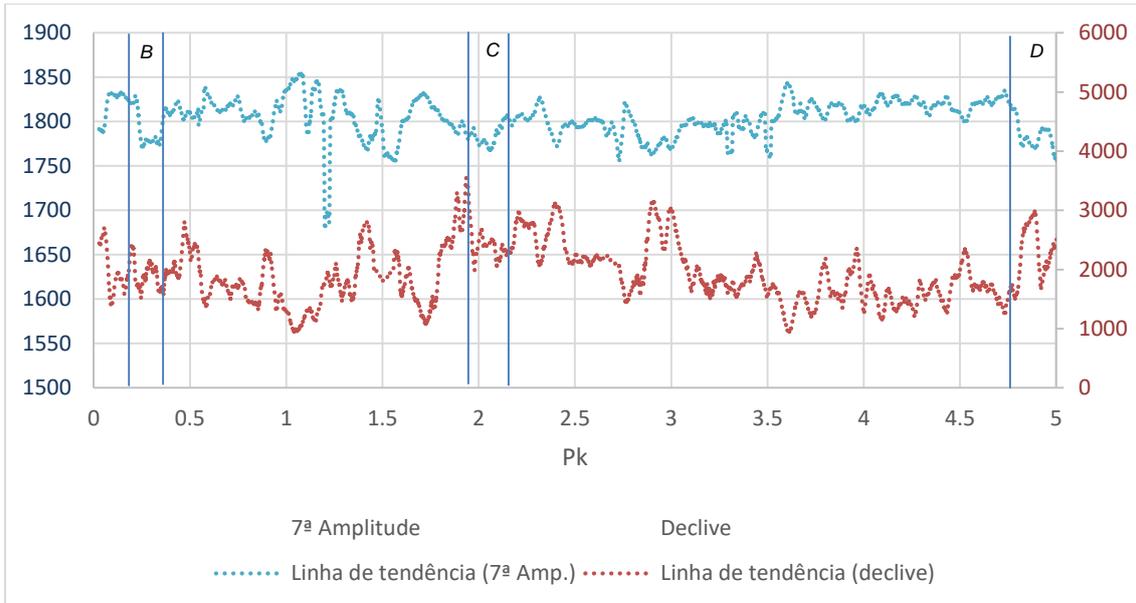


Figura 6.43 Resultados obtidos para a 7ª amplitude e para o declive ao longo dos primeiros 5 km

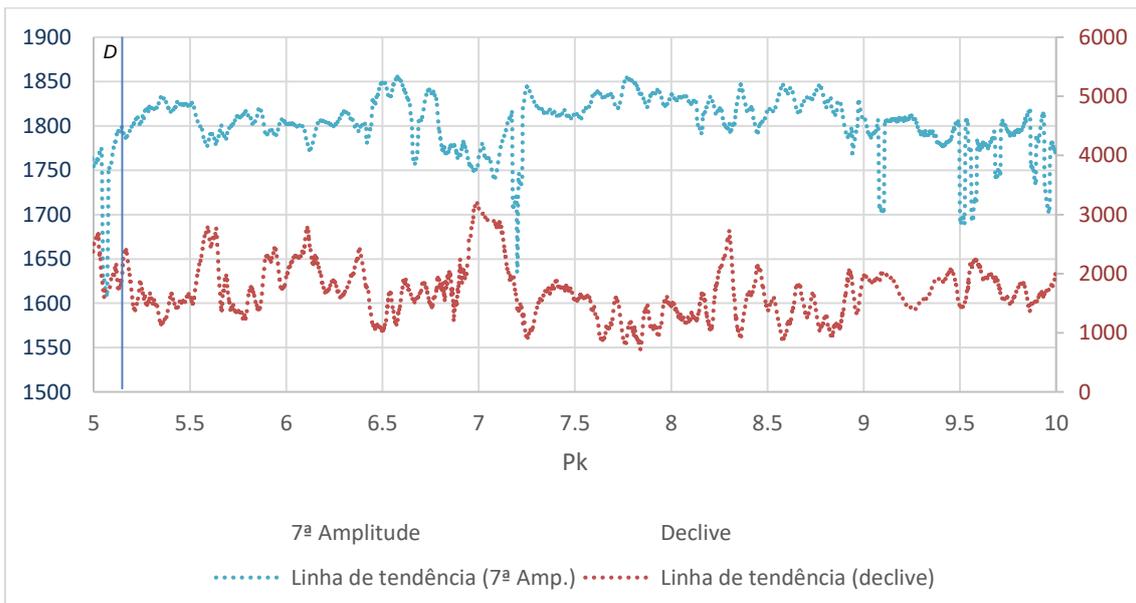


Figura 6.44 Resultados obtidos para a 7ª amplitude e para o declive ao longo dos últimos 5 km

Dos resultados apresentados anteriormente, observa-se que os valores associados à 7ª amplitude apresentam valores inferiores a 1800 para as secções em estudo. Ao se traçar uma linha horizontal nesse valor, é perceptível que grande parte do gráfico regista valores superiores a este; assim sendo este parâmetro poderá ser um indicativo da condição do balastro naquelas secções. Relativamente ao declive obteve-se valores muito diversos, apresentando valores acima de 2000 para as secções C e D, contudo, na secção B atingiu valores um pouco inferiores.

6.6 Considerações finais

A Transformada Rápida de Fourier recorre a um algoritmo comumente utilizado, entre muitas outras aplicações, na análise dinâmica de estruturas e utiliza-se também para o processamento de dados do radar de prospecção. Uma das suas grandes vantagens é a sua eficiência computacional, quando comparada com outras técnicas. Contudo, a limitação principal da aplicação desta ferramenta, no contexto da avaliação da condição do balastro, assenta no número de pontos de amostragem usualmente considerados nas campanhas de inspeção de via, aspeto que condiciona a resolução dos espectros de frequência calculados.

Pode afirmar-se que face ao observado no domínio do tempo, a metodologia proposta conseguiu identificar eficazmente a reflexão da última interface, tendo-se obtido, nas medições laboratoriais, valores de amplitude maiores nas amostras com maior índice de contaminação associado a um maior tempo de propagação da onda eletromagnética. De igual forma, para a secção D analisada, verificaram-se resultados bastante semelhantes a estes. Relativamente ao domínio da frequência, tendo em conta as abordagens feitas anteriormente, é importante destacar:

Análise da 5ª e 7ª amplitudes

Na primeira abordagem, verificou-se para a secção D que esta metodologia não conseguiu detetar variações significativas nas duas amplitudes estudadas enquanto para a secção E foi possível identificar diferenças na 5ª amplitude, comparando as secções com travessas do tipo bibloco com as secções com travessas de madeira, tendo nestas últimas a amplitude diminuído. Para a 7ª amplitude, foram notórios os valores atingidos na secção E3, coincidente com a zona do túnel.

Análise da variação de amplitude da 1ª para a 2ª

Nesta análise observou-se, novamente, para a secção do túnel valores muito acentuados embora os resultados das restantes secções não tenham sido muito expressivos. Para a secção D, verificou-se que o troço D1, onde houve intervenção, apresentou valores inferiores ao troço D2, em que não houve qualquer tipo de reabilitação.

Análise do declive definido pelos pontos de amplitude 2 e 7

Nesta última abordagem, considerando as duas secções do túnel, observaram-se para a secção E3 valores muito superiores a E2, sensivelmente o dobro, o que poderá sugerir o estado de deterioração presente em E3. Na secção D, verificaram valores maiores em D1 do que em D2.

Para a análise dos 10 km, observa-se que os parâmetros com mais ênfase correspondem à 5ª e 7ª amplitudes e à variação de amplitude entre a 1ª e a 2ª amplitudes. Em relação ao declive, obteve-se uma grande diversidade nos resultados, que não foram esclarecedores.

Capítulo 7

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS E LINHAS DE INVESTIGAÇÃO FUTURAS

7.1 Apreciação do trabalho desenvolvido

Com a elaboração do presente trabalho pretende-se sugerir uma nova metodologia que possa ser bastante útil na previsão da degradação das camadas de apoio, a aplicar em infraestruturas ferroviárias. Pretende-se assim controlar a evolução do nível de contaminação presente nestas camadas e executar uma gestão eficiente das ações de manutenção, economizando tempo e custos.

Deste modo, os trabalhos desta dissertação iniciaram-se, naturalmente, pelo estudo dos principais fatores inerentes ao processo de degradação de uma via-férrea balastrada e, particularmente, da camada de balastro que a compõe e pela problemática associada à metodologia que permite identificá-los de uma forma precoce e mais expedita.

No âmbito dos Ensaios Não Destrutivos, foi apresentado o equipamento do Radar de Prospecção que, sendo uma ferramenta potencialmente valiosa na avaliação de infraestruturas de transporte, constituiu o elemento principal para o estudo desenvolvido. Este equipamento é dotado de um sistema de antenas através do qual se consegue medir/avaliar algumas características da via, nomeadamente, a espessura das camadas, o nível de contaminação, o nível de teor em água presente no meio, etc. Foi dada particular importância aos procedimentos de preparação e condução do ensaio, visto poderem condicionar fortemente as medições e afetar, assim, os resultados daí obtidos.

Deste modo, foram alvo de estudo amostras obtidas em laboratório e em medições realizadas *in situ*, com o recurso a dois tipos de antenas, nomeadamente um da IDS com frequência de 400

MHz e outro, da GSSI, com uma frequência de 1 GHz. A adoção de frequências diferentes permitiu averiguar a adequabilidade da utilização de cada sistema de antenas na avaliação da contaminação do balastro e ainda permitiu, posteriormente, perceber a influência desses sistemas durante a fase de processamento dos dados, nos programas utilizados para o efeito.

As amostras laboratoriais consideradas reproduziam diferentes níveis de contaminação com diversos teores em água, simulados no modelo físico criado em laboratório. Em relação às medições *in situ*, provenientes de duas linhas férreas distintas, eram conhecidas algumas características assim como as campanhas em que se realizaram essas medições, uma referente ao período precedente às ações de manutenção e outra após intervenções em troços da via. No caso do sistema da IDS, dados referentes ao tipo de balastro e ao tipo de travessa também foram fornecidos, e para o sistema da GSSI a constante dielétrica e a espessura da camada de balastro (limpo e contaminado) foram os dados conhecidos. De salientar que, a aquisição de dados não foi coerente nas duas campanhas, o que inviabilizou a comparação das medições entre ambas. De facto, os parâmetros adotados aquando do levantamento dos dados não foi o mesmo, o que condicionou as medições em cada ensaio.

As infraestruturas ferroviárias demonstraram serem um ambiente pouco favorável para a aplicação do método do radar. Por um lado, verificou-se que a presença de certos elementos limitam a capacidade de penetração do sinal e a resolução das imagens, nomeadamente, os elementos metálicos (carris) e em betão (travessas) à superfície; dificultando assim a interpretação dos resultados. Por outro, o tamanho das partículas que tipicamente compõem as camadas de balastro e sub-balastro, conduzem muitas vezes a resultados com muito ruído, originado por eventuais fenómenos de difração nestas partículas.

Neste sentido, o programa de interpretação disponibilizado pretende reproduzir aspetos relevantes da condição da camada de balastro, verificando-se para as medições estáticas, efetuadas em condições controladas, que os resultados obtidos ainda estão longe de reproduzir de forma precisa o nível de contaminação associado assim como o teor em água inerente a cada amostra. Para os resultados *in situ*, verificou-se que o programa conseguiu, efetivamente, localizar troços que necessitam de reabilitação/intervenção, embora quantitativamente os valores obtidos tenham sido inconclusivos, não se conseguindo enlaçar conclusões da análise obtida.

Numa abordagem seguinte, como contribuição principal deste trabalho, recorreu-se ao programa de cálculo numérico *Matlab* no sentido de se fazer uma análise que averiguasse eventuais mudanças na qualidade do sinal das medições efetuadas. A metodologia assim adotada assenta na observação das variações do espectro no domínio da frequência, recorrendo-se a uma análise FFT, comparando posteriormente com o espectro do sinal registado no domínio do tempo. A comparação das duas análises (no tempo e em frequência) permitiram estabelecer convicções sobre o estado de degradação de cada uma das vias ferroviárias.

Assim, os resultados obtidos permitiram concluir que as secções que foram alvo de manutenção apresentaram valores mais baixos quando estudados alguns parâmetros, nomeadamente, a análise da 5ª amplitude e a análise da variação dos “picos” com maior amplitude. Das abordagens efetuadas conseguiu-se ainda localizar secções que necessitam de urgente intervenção. Tendo sido um contributo importante na avaliação da qualidade das camadas de apoio, no âmbito da investigação ferroviária.

Para concluir, as técnicas de processamento das medições efetuadas com o radar de prospeção foram desenvolvidas para simplificar e validar a interpretação dos dados. Os resultados mostraram assim que o GPR consegue localizar zonas com maior degradação na subestrutura da via, para a maioria das secções com base na interpretação em frequência. Outra particularidade desta análise é o facto de poder contribuir para uma manutenção mais eficaz e económica da via.

7.2 Linhas de investigação futuras

Os dados do radar de prospeção foram alvo de estudo no presente trabalho no sentido de apurar o quão bem o radar pode definir as condições da subestrutura, identificar as áreas problemáticas da via e fornecer uma possível indicação da causa do problema. Como desenvolvimentos futuros aconselha-se uma análise que inclua a comparação dos dados do GPR com a geometria da via, englobando ainda a estratigrafia do subsolo e as condições do balastro, tanto ao nível da contaminação como do teor em água. Em sequência destes ensaios deverão ainda, ao mesmo tempo, realizar-se poços sempre que possível, nos troços analisados, para que exista uma maior fiabilidade da análise.

Mais especificamente, se se pretender fazer uma análise no domínio da frequência, aconselha-se a utilização de, no mínimo, 1024 amostras por scan, em vez das habituais 512. Assim é possível registar um maior número de informação, diminuindo deste modo a variabilidade dos resultados e atenuando possíveis erros na análise. Ainda de salientar a necessidade do cuidado acrescido em relação à localização: início do ficheiro, direção e velocidade do ensaio; para comparação de diferentes campanhas.

Por outro lado, o conhecimento das causas da degradação da estrutura deverá ser aproveitada para a conceção de novos projetos. Em particular, seria interessante promover a criação de critérios de classificação para as ferrovias portuguesas, para uso em posteriores trabalhos de reabilitação. Estes deveriam considerar aspetos como o grau e tipo de contaminação do balastro e a variação do teor em água, ponderados em função das condições climáticas. De salientar que estes índices constituiriam assim ferramentas importantes na gestão da conservação e na garantia da segurança, já que permitiriam estabelecer critérios de alerta e normas de atuação.

Em Portugal, seria igualmente interessante uma aposta na aquisição de equipamentos por parte das entidades envolvidas na conceção, construção e manutenção de infraestruturas.

Referências Bibliográficas

- [1] Guedelha, P., «Materiais elásticos como elementos de proteção em vias balastradas,» Dissertação de Mestrado, ISEL, Lisboa, 2012.
- [2] Fortunato, E. M. C., «Renovação de plataformas ferroviárias. Estudos relativos à Capacidade de Carga,» Dissertação de Doutoramento, FEUP, Universidade do Porto, Porto, 2005.
- [3] Pedrosa, M. J. N., «Caracterização da fundação de infra-estruturas de transporte com recurso ao georadar. Identificação das camadas de apoio,» Dissertação de Mestrado, FEUP, Universidade do Porto, Porto, 2009.
- [4] Baldeiras, M., «Inspeção à infra-estrutura ferroviária,» Palestra REFER, Lisboa, 2013.
- [5] De Chiara, F., «Improvement of railway track diagnosis using Ground Penetrating Radar,» Dissertação de Doutoramento, Universidade de Roma "Sapienza", Roma, 2014.
- [6] Esveld, C., «Modern Railway Track.,» Second Edition. MRT-Productions. Delft University of Technology., Delft, 2001.
- [7] Fontul, S., Sebenta das aulas da disciplina de Infraestruturas Ferroviárias e Portuárias, Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2015.
- [8] Machado, A. B., «Contribuição para a avaliação estrutural de infraestruturas rodoviárias por Métodos Não Destrutivos,» Dissertação de Mestrado, FCT, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.
- [9] Selig, E.; Waters, J., Track Geotechnology and Substructure Management, London: Thomas Telford Publications, 1994.
- [10] 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,» Federal Railroad Administration Project DTFR53-05-D-00200, USA, 2006.
- [11] Tennakoon, N.; Indraratna, B.; Rujikiatkamjorn, C.; Nimbalkar, S., «Assessment of ballast fouling and its implications on track drainage,» Faculty of Engineering, University of Wollongong; 11th Australia - New Zealand Conference on Geomechanics: Ground Engineering in a Changing World (pp. 421-426), Australia, 2012.
- [12] Indraratna, B.; Su, L.; Rujikiatkamjorn, C., «A new parameter for classification and evaluation of railway ballast fouling,» Can. Geotech. J., vol. 48, pp322-326, Roma, Itália, 2011.
- [13] Vorster, D., «The use of Ground Penetrating Radar for track substructure characterization,» Dissertação de Mestrado, Faculty of Engineering, University of Pretoria, Pretoria, 2012.
- [14] Ibrek, P., «Detecting Anomalies and Water Distribution in Railway Ballast Using GPR,» Dissertação de Mestrado, Norwegian University of Science and Technology, Noruega, 2015.

- [15] Saarenketo, T.; Scullion, T., Road evaluation with Ground Penetrating Radar, Finland: Journal of Applied Geophysics, vol. 43 (pp.119–138), 2000.
- [16] Lopes, A. M., «Avaliação da degradação de vias férreas. Caracterização do balastro com recurso ao georadar.» Dissertação de Mestrado, FCT, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.
- [17] Silvast, M.; Nurmikolu, A.; Wiljanen, B.; Levomaki, M., «An inspection of railway ballast quality using ground penetrating radar in Finland,» Proc. IMechE Vol. 224 Part F, Journal Rail and Rapid Transit, Finland, 2010.
- [18] Fernandes, F. M.; Lourenço, P. B., «Aplicações do georadar na reabilitação e detecção de anomalias,» Congresso Construção, 3º Congresso Nacional, Universidade de Coimbra, Portugal, 2007.
- [19] Saarenketo, T., «Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of Ground Penetrating Radar in traffic infrastructure surveys,» Dissertação de Doutoramento, Faculty of Science, Department of Geosciences, University of Oulu, Finland, 2006.
- [20] Sussmann, T. R., «Application of ground penetrating radar to railway track substructure maintenance management,» Dissertação de Doutoramento, University of Massachusetts, Amherst, USA, 1999.
- [21] ASTM, *D6432 – 11: Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation*, 2011.
- [22] «<<http://geophysical.com/>>,» Geophysical Survey Systems, Inc. (GSSI), consultado em Novembro 2016.
- [23] Conyers, L. B., «Ground-penetrating radar for anthropological research,» ANTIQUITY, vol. 84 (pp. 1–11), USA, 2010.
- [24] Schultz, J. J., «Detecting Buried Remains Using Ground-Penetrating Radar,» Final Report Submitted to National Institute of Justice, Office of Justice Programs, U.S. Department of Justice, USA, April 2012.
- [25] Benedetto, A.; Pajewski, L., «Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar,» Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering, Switzerland, 2015.
- [26] Olhoeft, G. R.; Selig, E. T., «Ground Penetrating Radar evaluation of railway track substructure conditions,» Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar, Proceedings of SPIE Vol. 4758 (pp48-53), USA, 2002.
- [27] Al-Qadi, I. L.; Xie, W.; Roberts, R., «Scattering analysis of ground-penetrating radar data to quantify railroad ballast contamination,» NDT&E International, 41 (pp.441-447), Washington, DC, 2008.
- [28] Fontul, S., «Structural evaluation of flexible pavements using non-destructive tests,» Dissertação de Doutoramento, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2004.

- [29] Grégoire, C.; Van der Wielen, A.; Van Geem, C.; Drevet, J., «Methodologies for the Use of Ground-Penetrating Radar in Pavement Condition Surveys,» Belgian Road Research Centre (BRRC), Brussels, 2016.
- [30] Van Geem, C., «Practical session: GPR data processing – Roads,» COST TU1208: Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar, Belgian Road Research Centre, Bélgica, 2017.
- [31] Miguel, F., «Manutenção de Infraestruturas Ferroviárias. Métodos não destrutivos de inspeção de via,» Dissertação de Mestrado, FCT, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2015.
- [32] Yelf, R.; Yelf, D., «Where is True Time Zero?,» Georadar Research Pty Ltd, Australia, 2006.
- [33] De Chiara, F.; Fontul, S.; Fortunato, E. , «GPR Laboratory Tests For Railways Materials Dielectric Properties Assessment,» Article, Remote Sensing, 6, Lisboa, 2014.
- [34] Smith, S. W., The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing, Chapter 8: The Discrete Fourier Transform, California: California Technical Publishing, 1997.
- [35] Dotta, I., «Desenvolvimento de uma ferramenta para análise e detecção automática de estágios do sono em exames de polissonografia,» Dissertação de Pós-graduação, Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, Brasil, 2015.
- [36] «<<http://www.seara.ufc.br>>,» Seara da Ciência - Órgão de divulgação científica e tecnológica da Universidade Federal do Ceará, consultado em Janeiro de 2017.
- [37] Smith, S. W., The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing, Chapter 31: The Complex Fourier Transform, California: California Technical Publishing, 1997.
- [38] Vale, C., «Influência da qualidade dos sistemas ferroviários no comportamento dinâmico e no planeamento da manutenção preventiva de vias de alta velocidade,» Dissertação de Doutoramento, FEUP, Universidade do Porto, Porto, 2010.
- [39] Saarenketo, T., GPR Applications in Europe, Washington D.C., USA: Proceedings of the Transportation Research Board 85th Annual Meeting, 2006.
- [40] ASTM, *D4748 – 10: Standard Test Method for Determining the Thickness of Bound Pavement Layers Using Short-Pulse Radar*, 2011.
- [41] I. MATLAB - MathWorks, «<<https://www.mathworks.com>>».
- [42] Rodés, J., «Diseño de un indicador de apoyo a la gestión de firmes basado en Ground Penetrating Radar. Análisis de la forma del espectro de onda de GPR como indicador de estado de firmes asfálticos,» Dissertação de Doutoramento, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2016.
- [43] Berawi, A., «Improving Railway Track Maintenance using Power Spectral Density (PSD),» Dissertação de Doutoramento, FEUP, Universidade do Porto, Porto, 2013.

Anexo I

Tabela I.1 Propriedades eletromagnéticas para a frequência 100 MHz, adaptado [2] [19] [40]

Material	Constante dielétrica (ϵ_r)	Condutividade elétrica (σ) (mS/m)	Velocidade de propagação da energia eletromagnética (v) (m/ns)
Ar	1	0	0.3
Água destilada	81	0.01	0.033
Água doce	81	0.5	0.033
Água salgada	81	400	0.01
Areia seca	3 - 5	0.1 - 1	0.12 - 0.15
Areia saturada	20 - 30	0.1 - 1	0.06
Calcário	4 - 8	0.5 - 2	0.10 - 0.15
Xisto argiloso	5 - 15	1 - 100	0.09
Silte	16 - 30	1 - 100	0.07
Argila	25 - 40	2 - 1000	0.06
Granito	5 - 8	0.01 - 1	0.11 - 0.15
Gelo	3 - 4	0.01	0.16

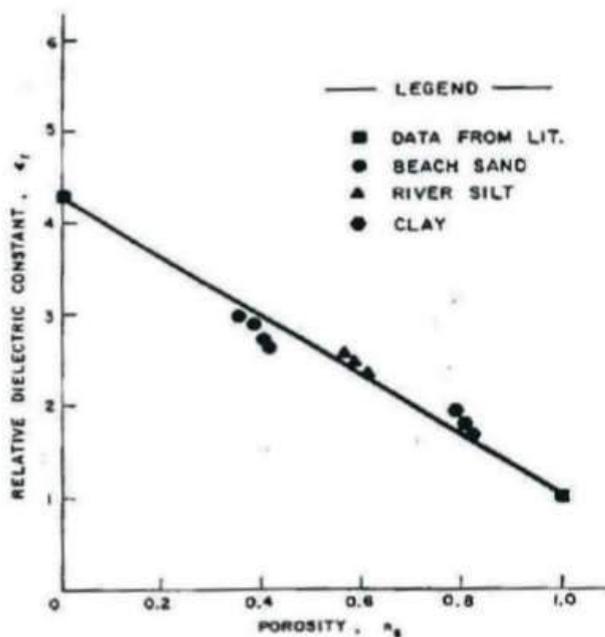


Figura I.1 Efeito da porosidade na constante dielétrica

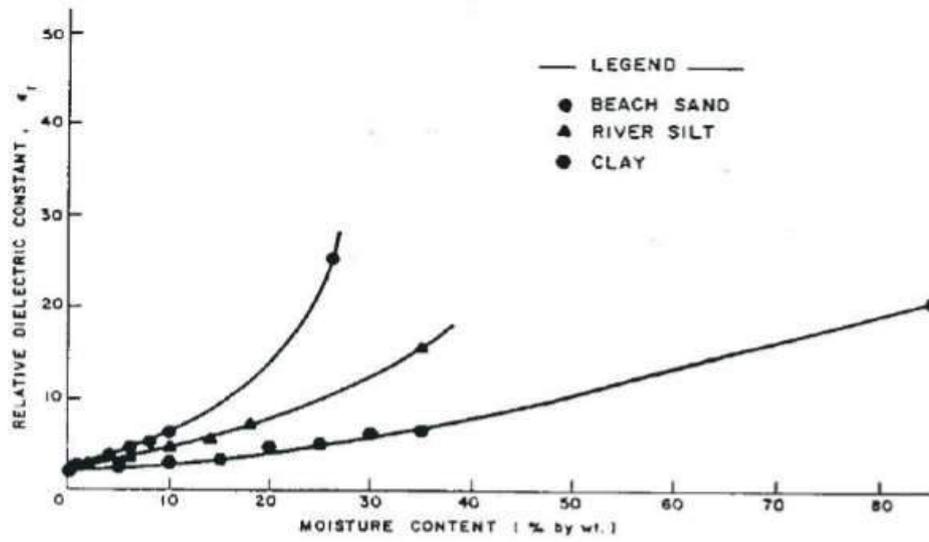


Figura I.2 Efeito do teor em água na constante dielétrica para diversas granulometrias

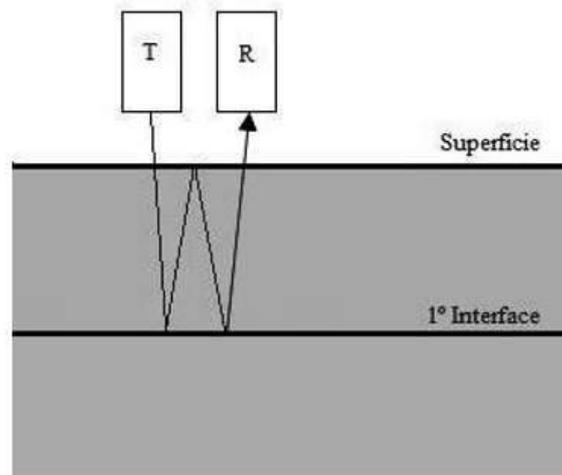


Figura I.3 Exemplo de formação de um múltiplo

Anexo II

- Resultados obtidos para as amostras laboratoriais com o sistema da IDS (domínio do tempo e domínio da frequência)

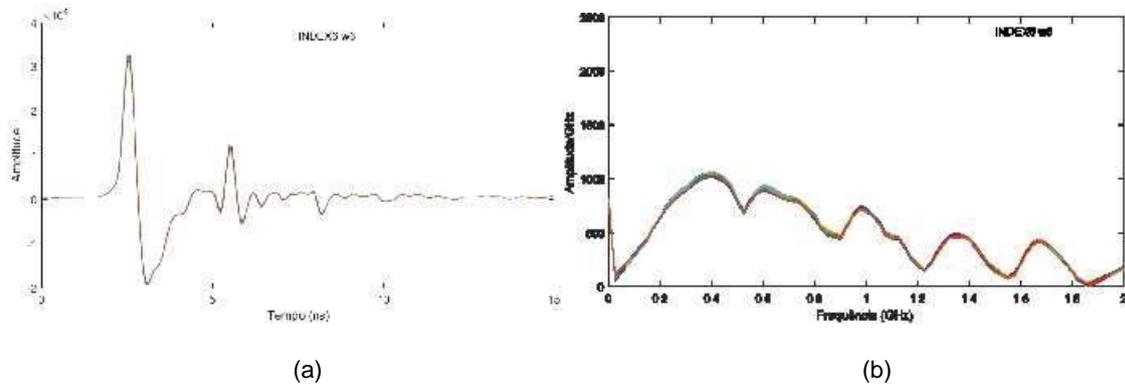


Figura II.1 Resultados obtidos para o índice de contaminação 6 e $w = 6\%$: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

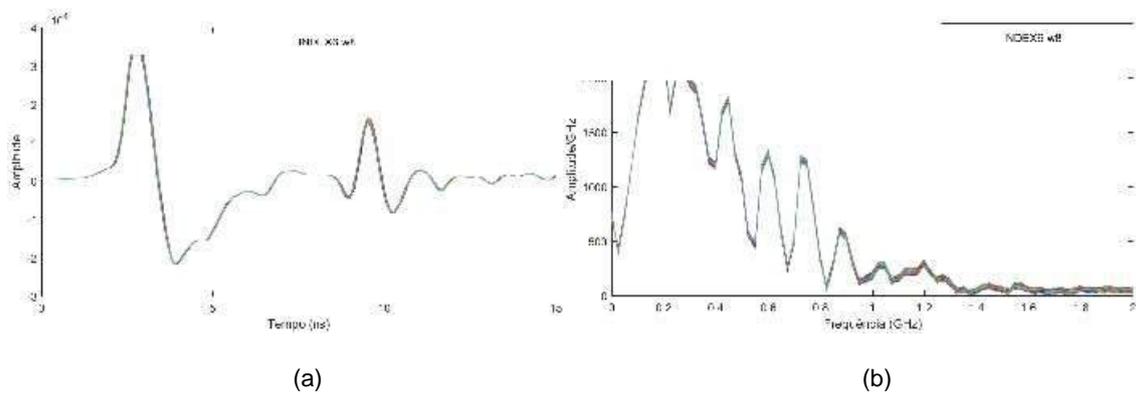


Figura II.2 Resultados obtidos para o índice de contaminação 6 e $w = 8\%$: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

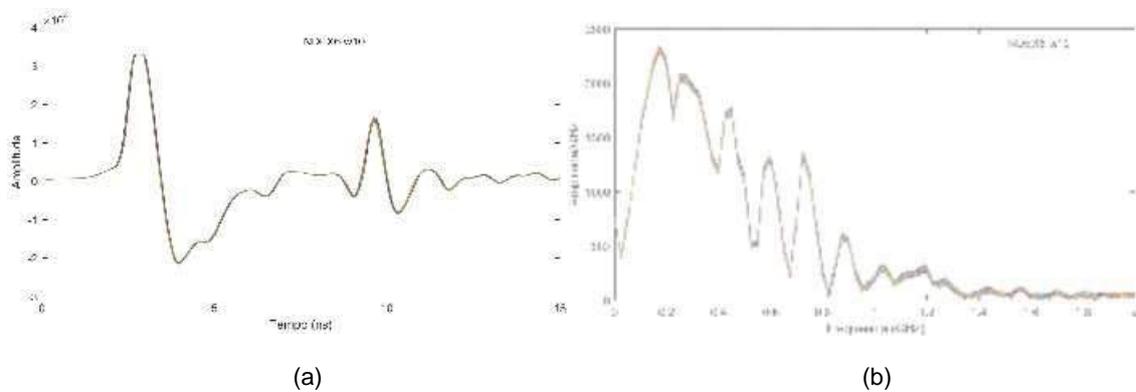


Figura II.3 Resultados obtidos para o índice de contaminação 6 e $w = 10\%$: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

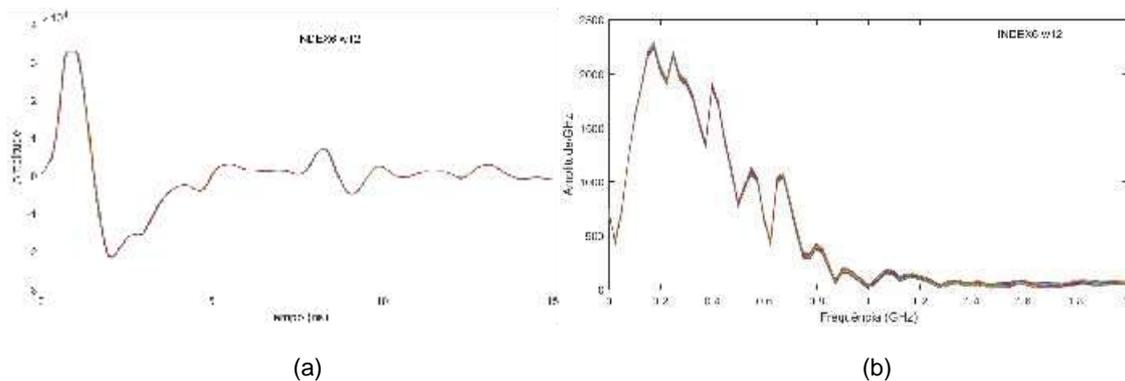


Figura II.4 Resultados obtidos para o índice de contaminação 6 e $w = 12\%$: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

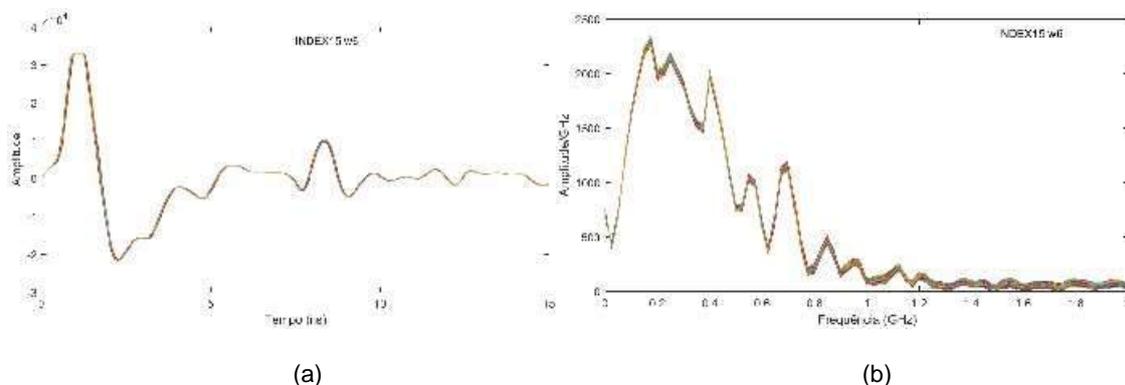


Figura II.5 Resultados obtidos para o índice de contaminação 15 e $w = 6\%$: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

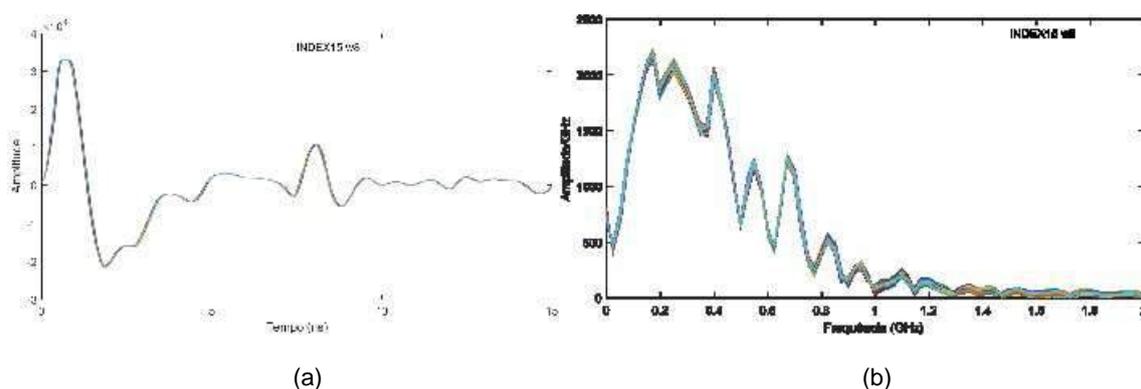


Figura II.6 Resultados obtidos para o índice de contaminação 15 e $w = 8\%$: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

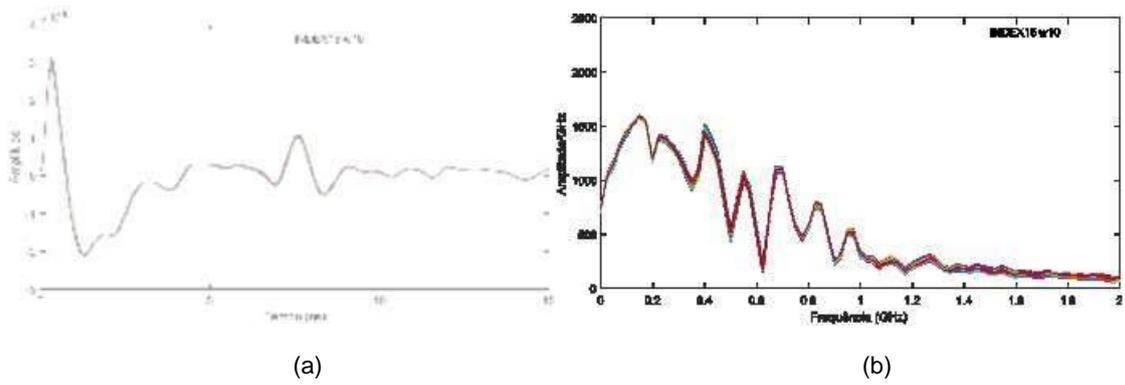


Figura II.7 Resultados obtidos para o índice de contaminação 15 e $w = 10\%$: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

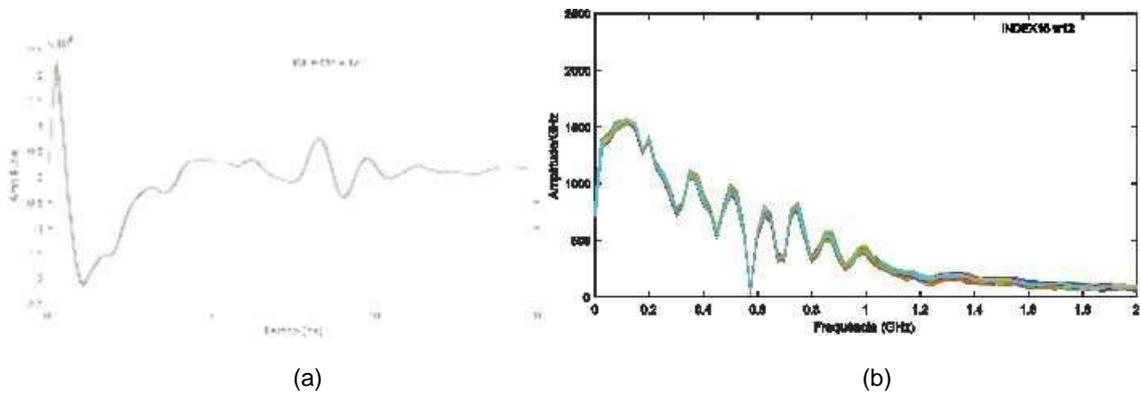


Figura II.8 Resultados obtidos para o índice de contaminação 15 e $w = 12\%$: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

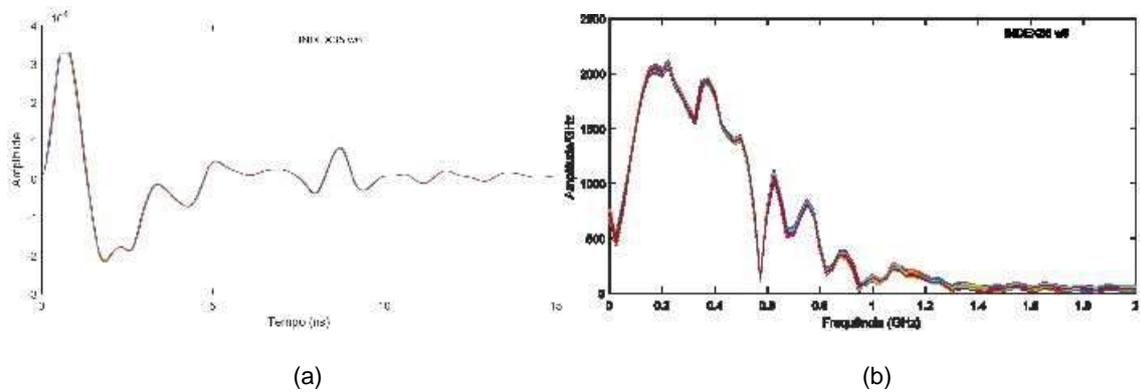


Figura II.9 Resultados obtidos para o índice de contaminação 35 e $w = 6\%$: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

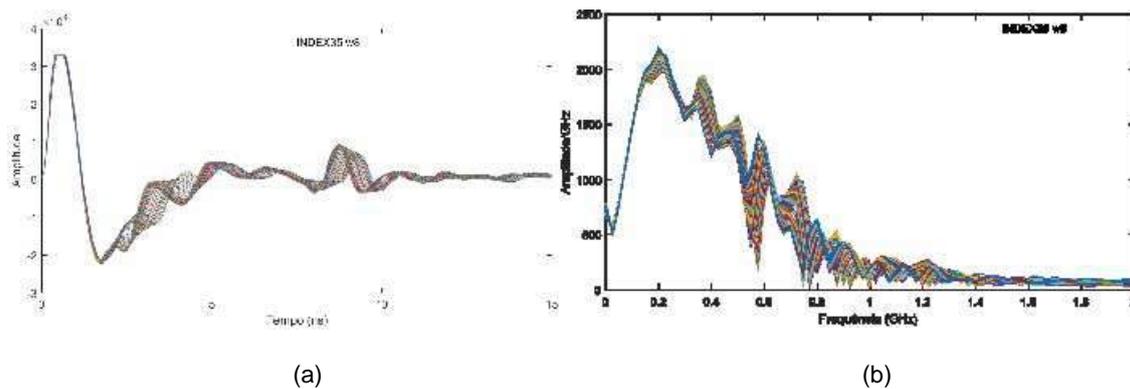


Figura II.10 Resultados obtidos para o índice de contaminação 35 e $w = 8\%$: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

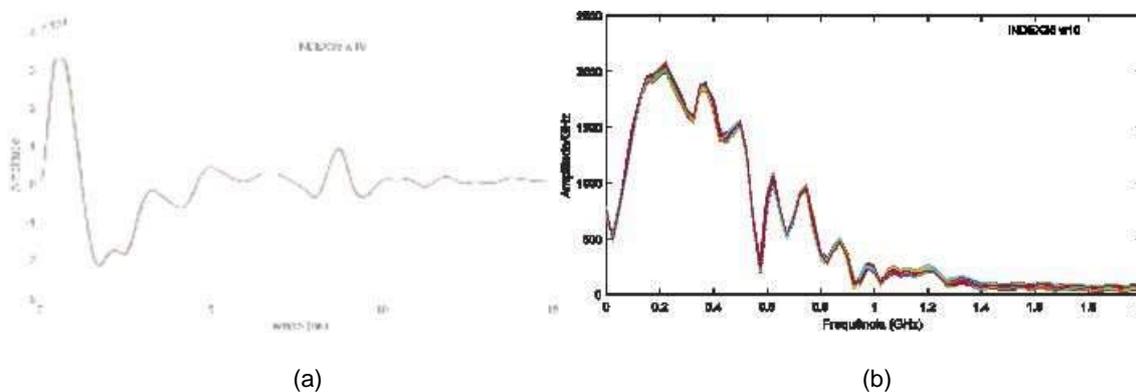


Figura II.11 Resultados obtidos para o índice de contaminação 35 e $w = 10\%$: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

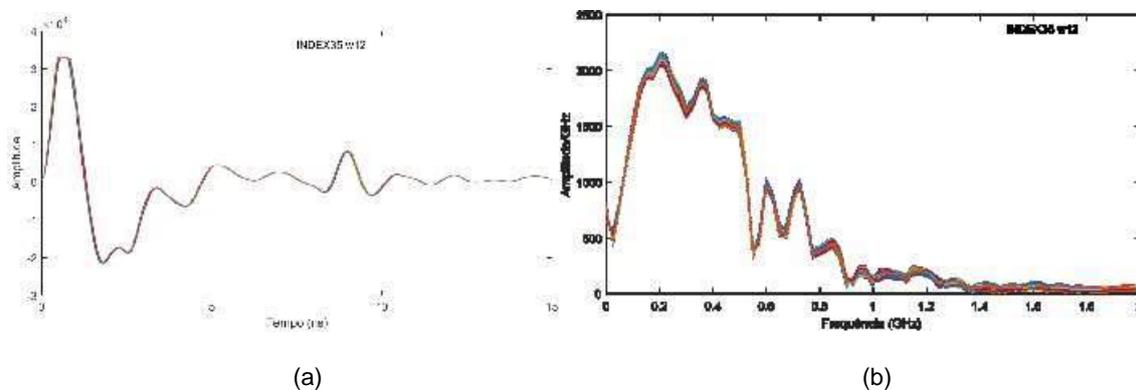


Figura II.12 Resultados obtidos para o índice de contaminação 35 e $w = 12\%$: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

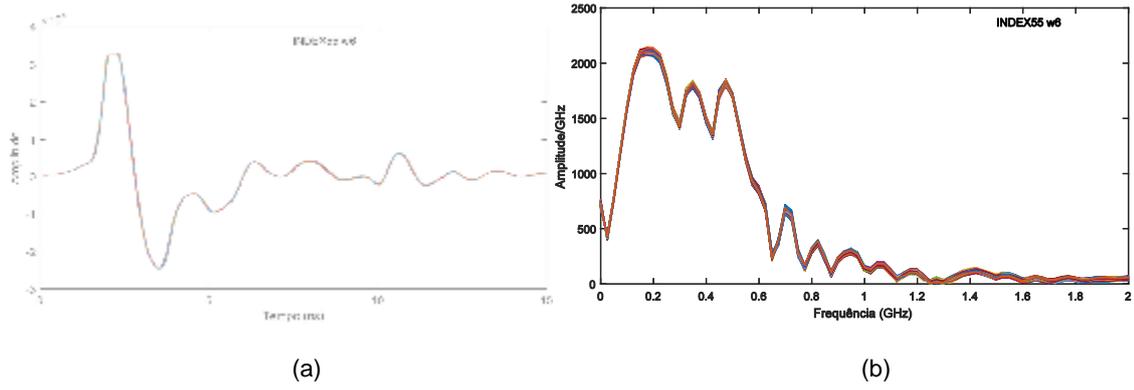


Figura II.13 Resultados obtidos para o índice de contaminação 55 e $w = 6\%$: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

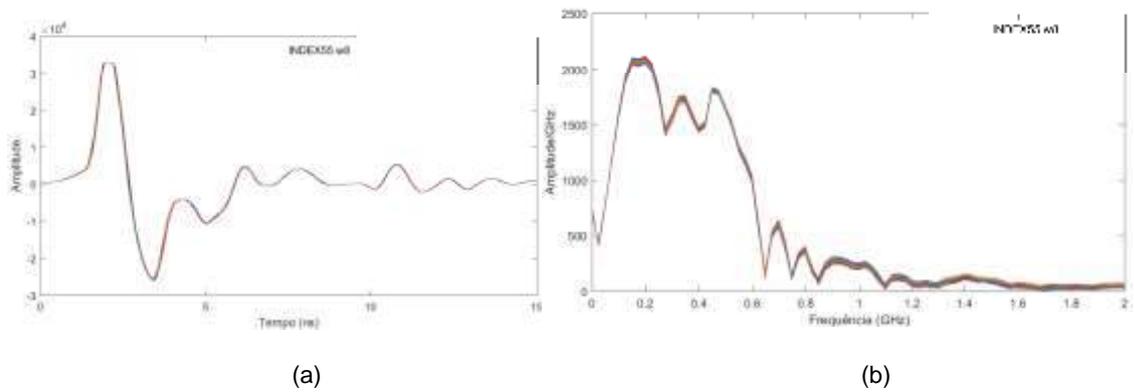


Figura II.14 Resultados obtidos para o índice de contaminação 55 e $w = 8\%$: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

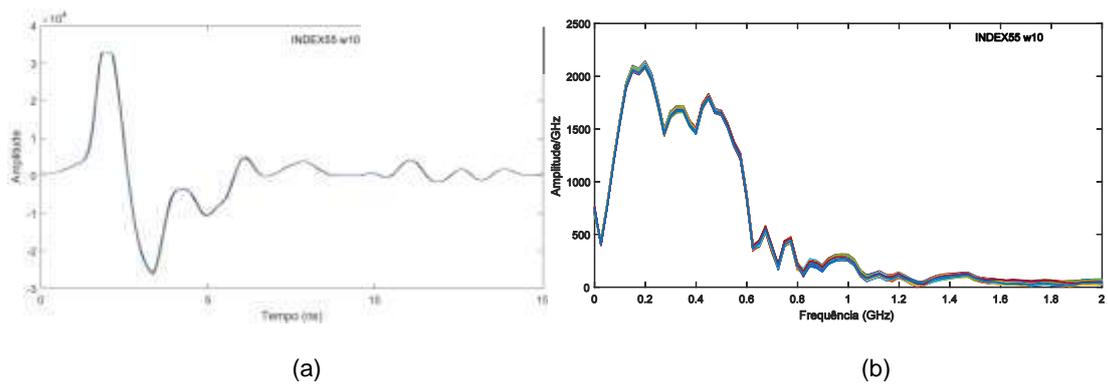


Figura II.15 Resultados obtidos para o índice de contaminação 55 e $w = 10\%$: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

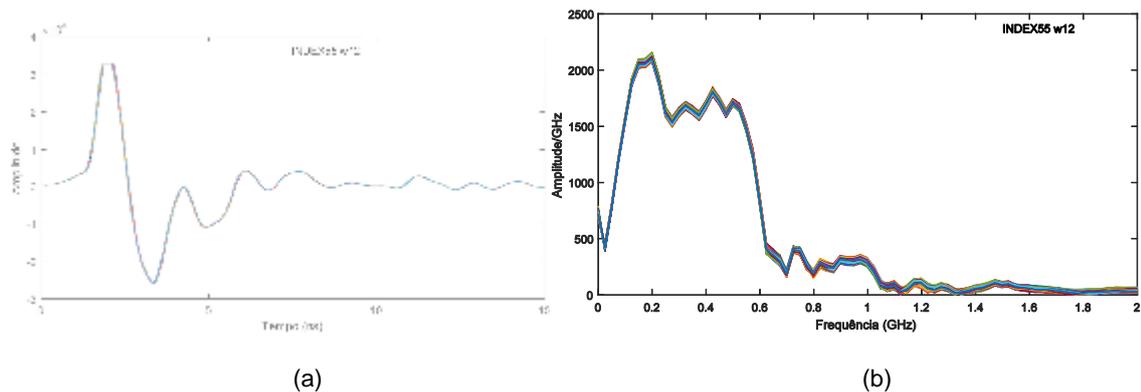


Figura II.16 Resultados obtidos para o índice de contaminação 55 e $w = 12\%$: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

- Resultados obtidos para as amostras laboratoriais com o sistema da GSSI (domínio do tempo e domínio da frequência)

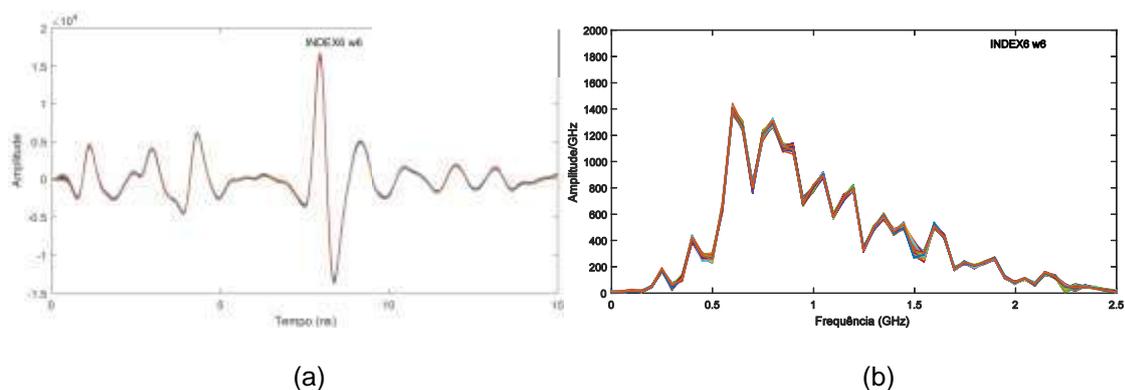


Figura II.17 Resultados obtidos para o índice de contaminação 6 e $w = 6\%$: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

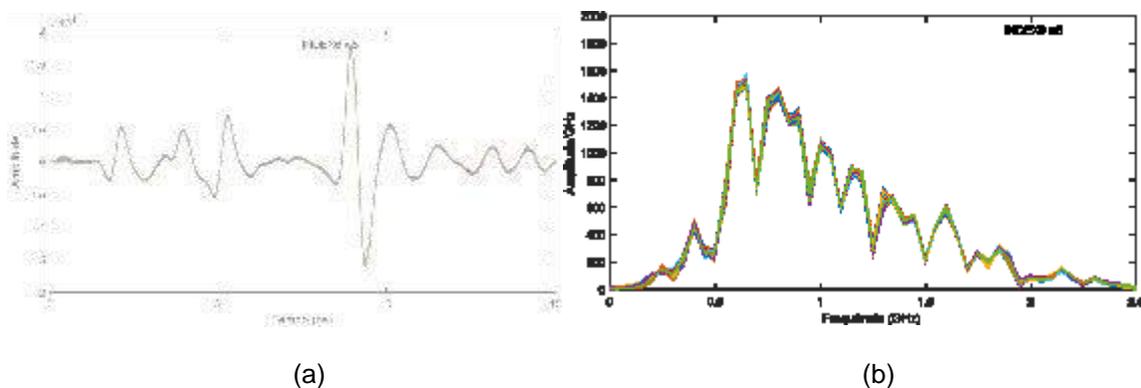


Figura II.18 Resultados obtidos para o índice de contaminação 6 e $w = 8\%$: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

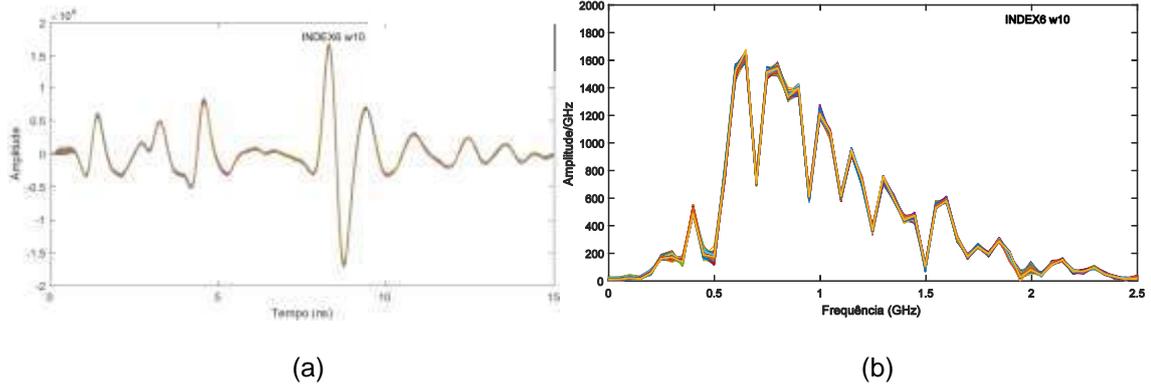


Figura II.19 Resultados obtidos para o índice de contaminação 6 e $w = 10\%$: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

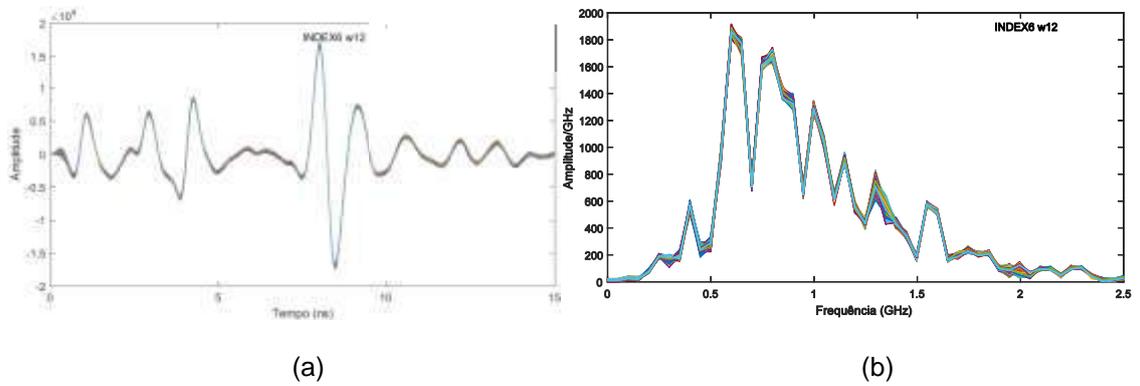


Figura II.20 Resultados obtidos para o índice de contaminação 6 e $w = 12\%$: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

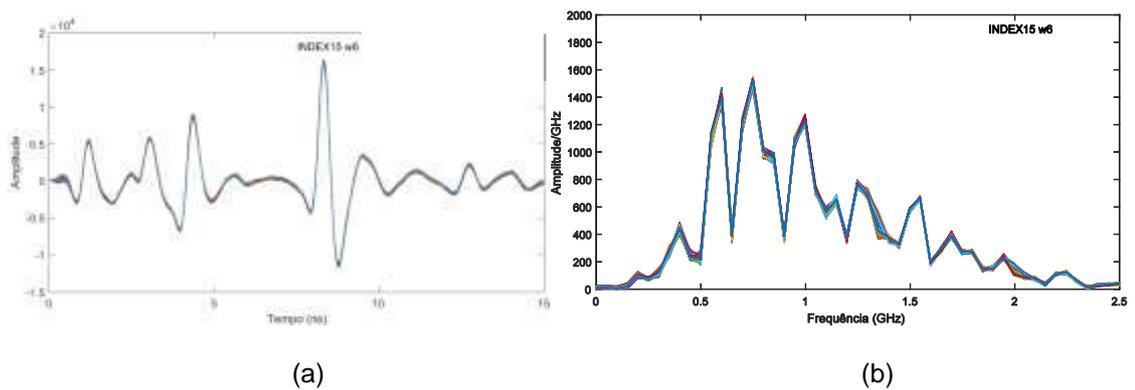


Figura II.21 Resultados obtidos para o índice de contaminação 15 e $w = 6\%$: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

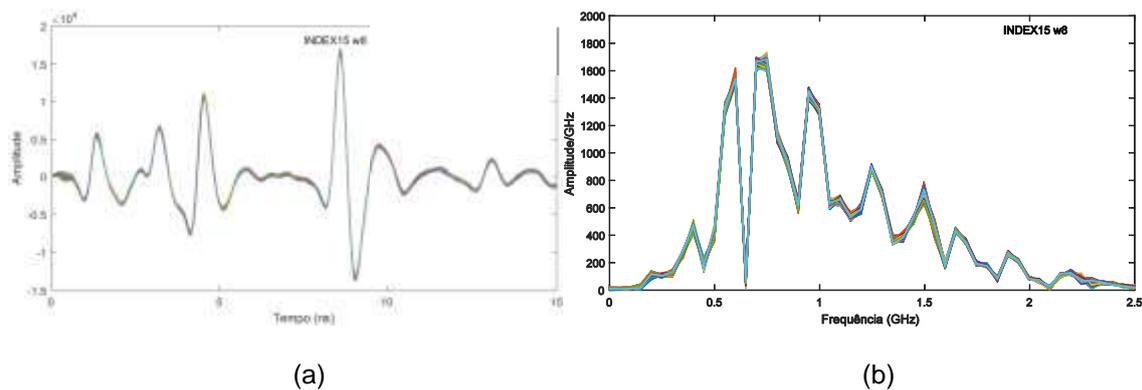


Figura II.22 Resultados obtidos para o índice de contaminação 15 e $w = 8\%$: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

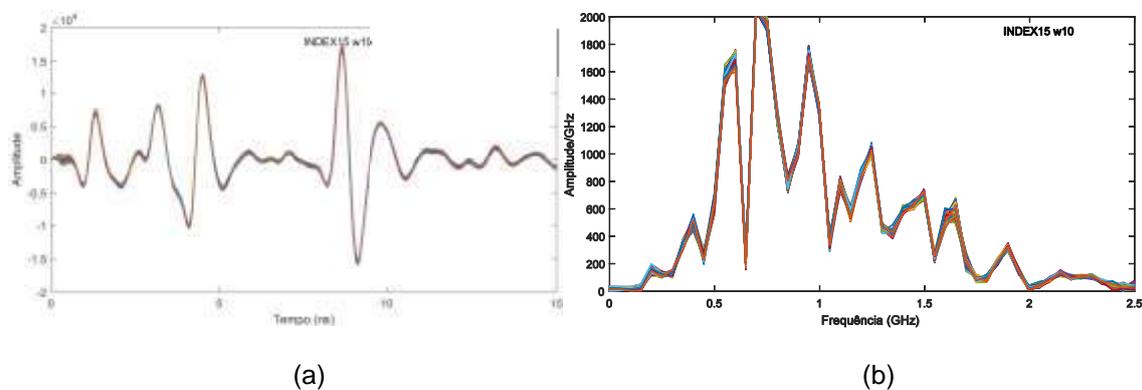


Figura II.23 Resultados obtidos para o índice de contaminação 15 e $w = 10\%$: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

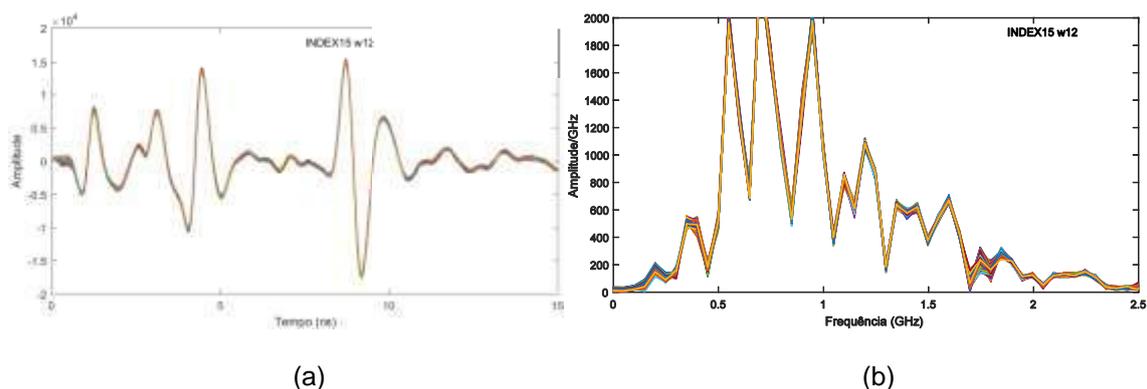


Figura II.24 Resultados obtidos para o índice de contaminação 15 e $w = 12\%$: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

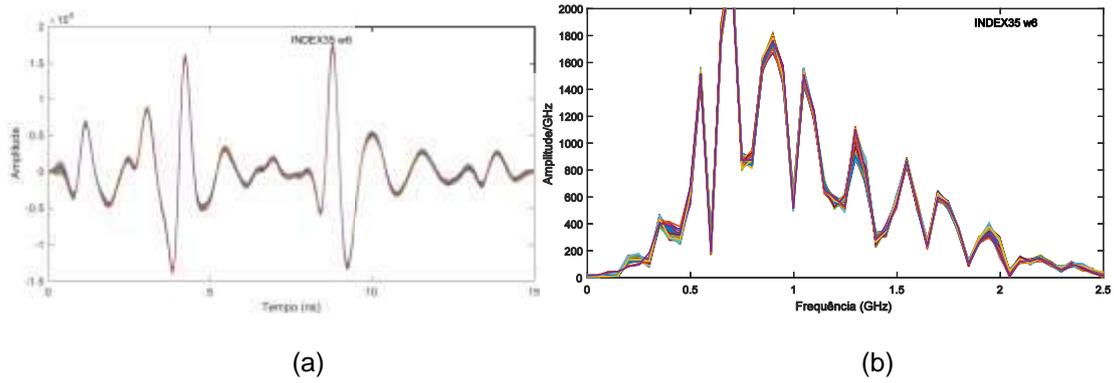


Figura II.25 Resultados obtidos para o índice de contaminação 35 e $w = 6\%$: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

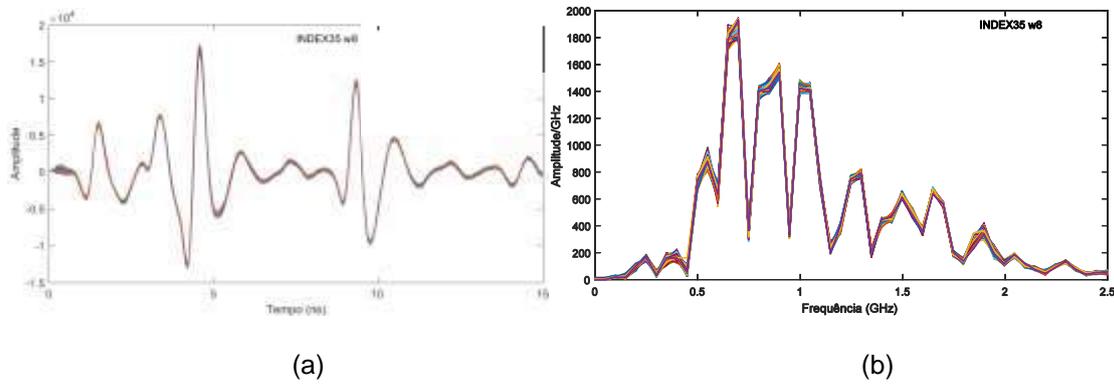


Figura II.26 Resultados obtidos para o índice de contaminação 35 e $w = 8\%$: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

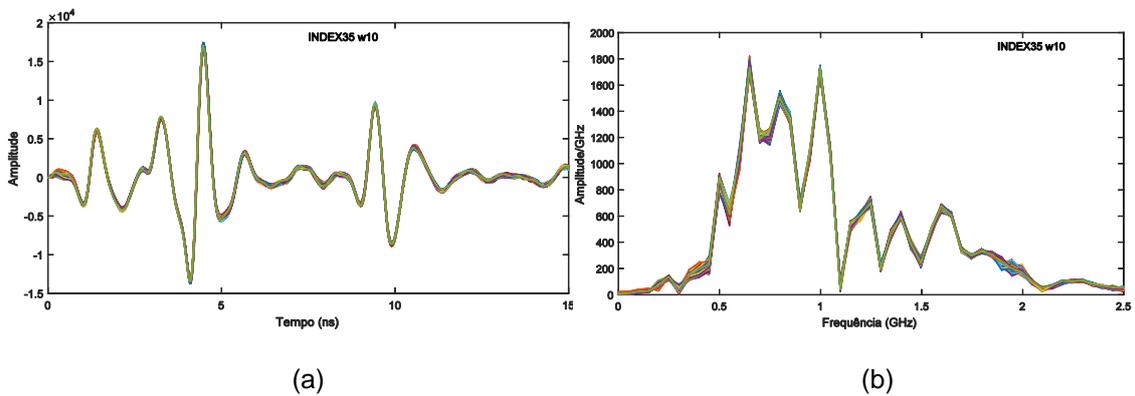


Figura II.27 Resultados obtidos para o índice de contaminação 35 e $w = 10\%$: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

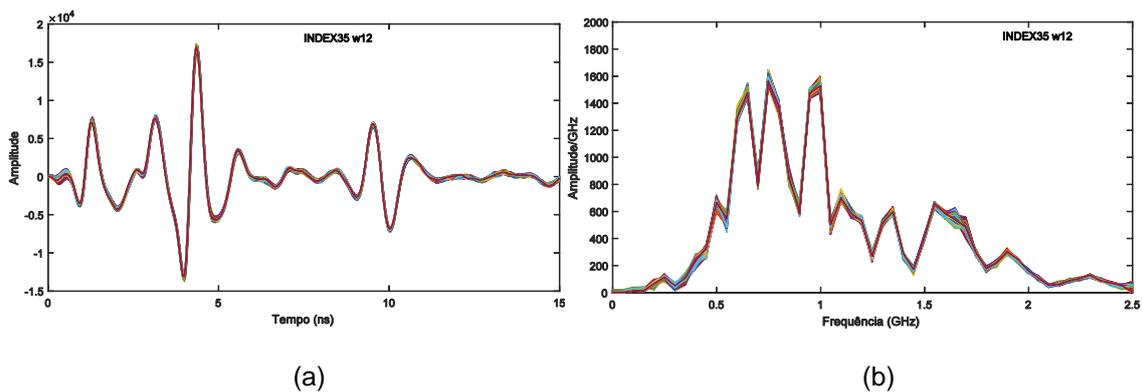


Figura II.28 Resultados obtidos para o índice de contaminação 35 e $w = 12\%$: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

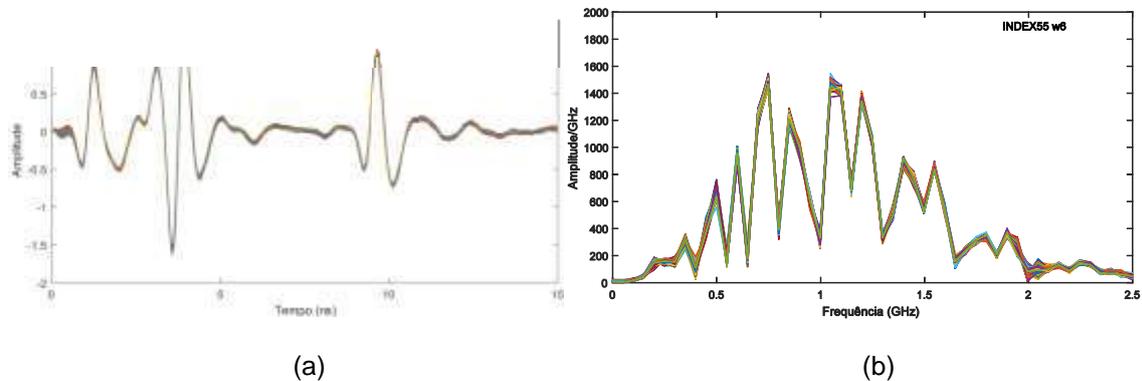


Figura II.29 Resultados obtidos para o índice de contaminação 55 e $w = 6\%$: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

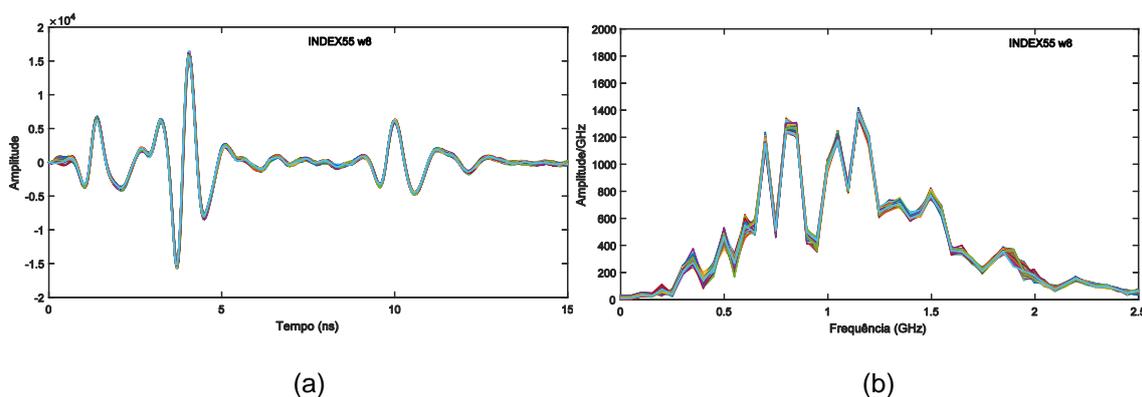


Figura II.30 Resultados obtidos para o índice de contaminação 55 e $w = 8\%$: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

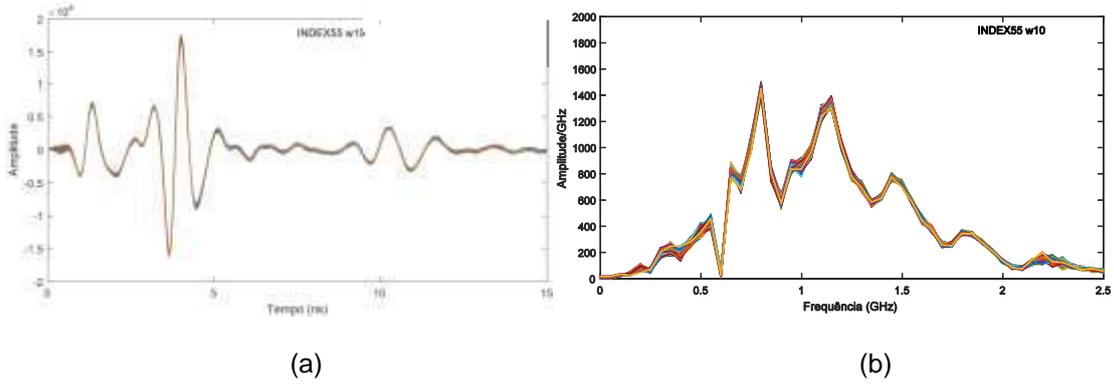


Figura II.31 Resultados obtidos para o índice de contaminação 55 e $w = 10\%$: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

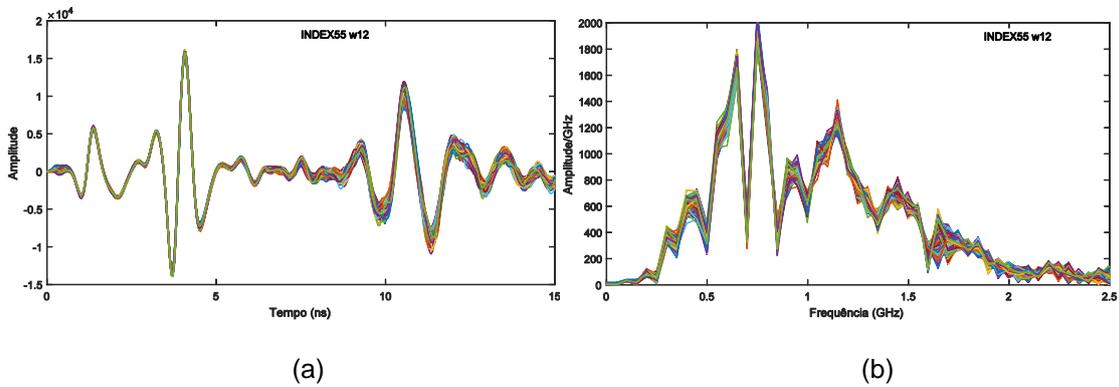


Figura II.32 Resultados obtidos para o índice de contaminação 55 e $w = 12\%$: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

- Resultados obtidos para as Secções E1, E2, E3 e E4 (domínio do tempo e domínio da frequência)

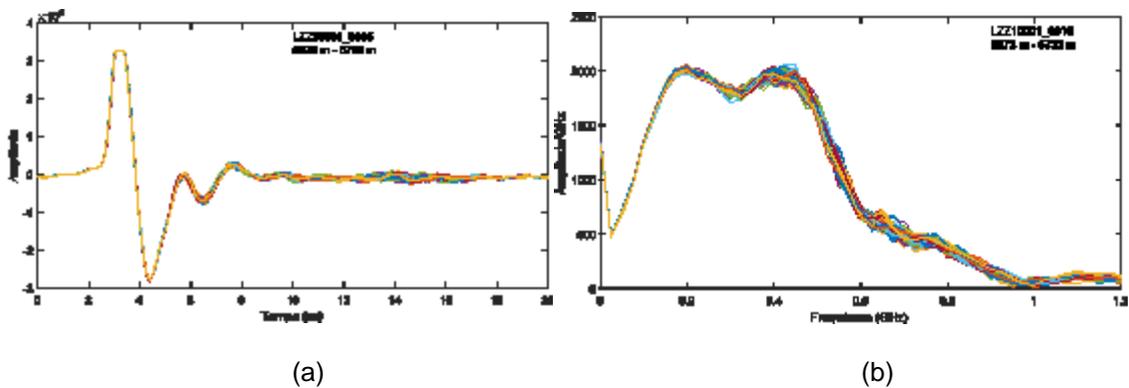


Figura II.33 Resultados obtidos para a secção E1: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

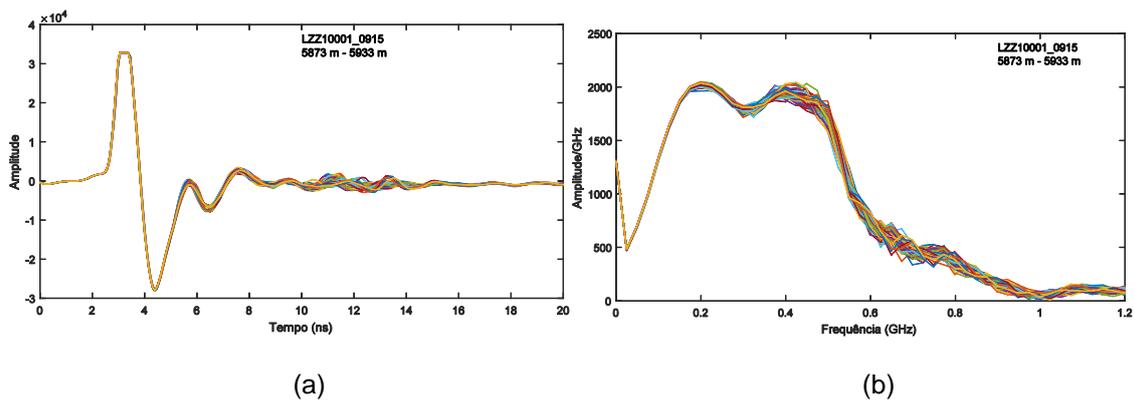


Figura II.34 Resultados obtidos para a secção E2: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

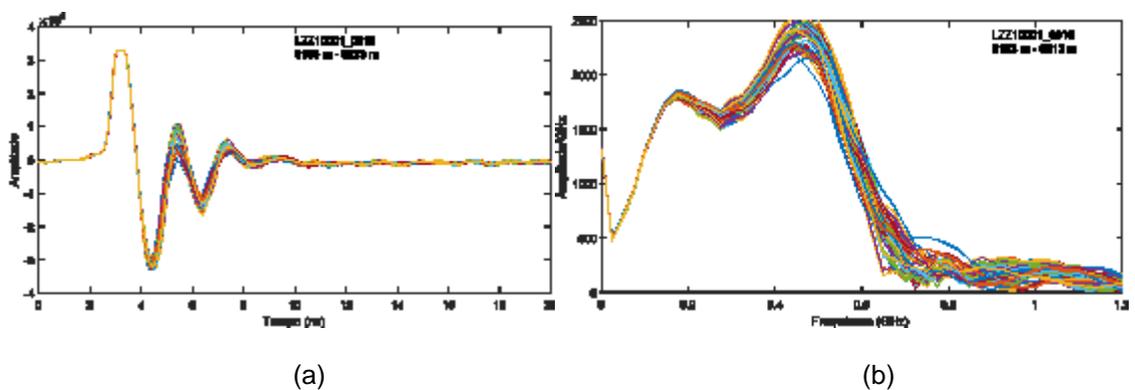


Figura II.35 Resultados obtidos para a secção E3: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

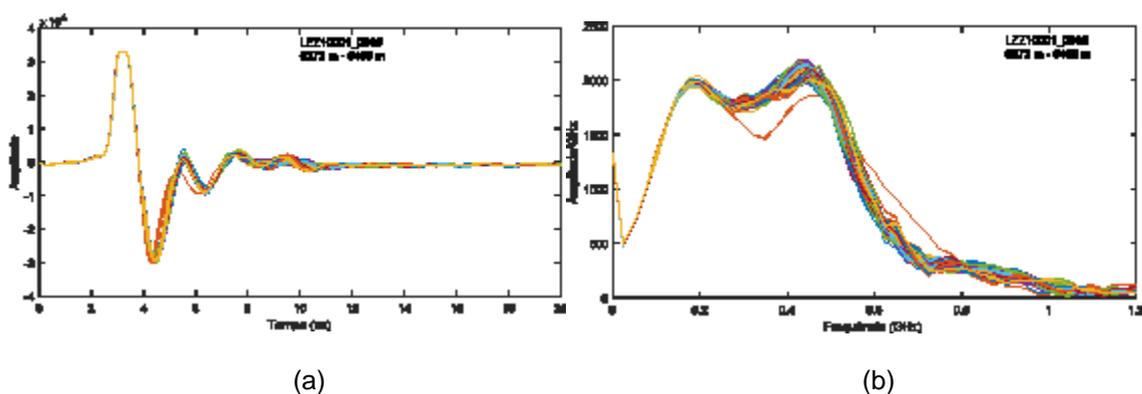


Figura II.36 Resultados obtidos para a secção E4: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

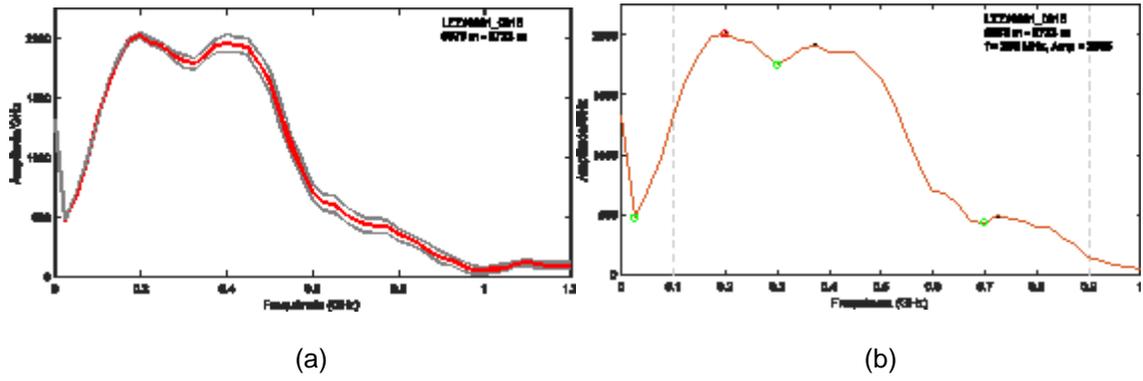


Figura II.37 Resultados obtidos para a secção E1: (a) mediana (b) leitura dos “picos” relativos

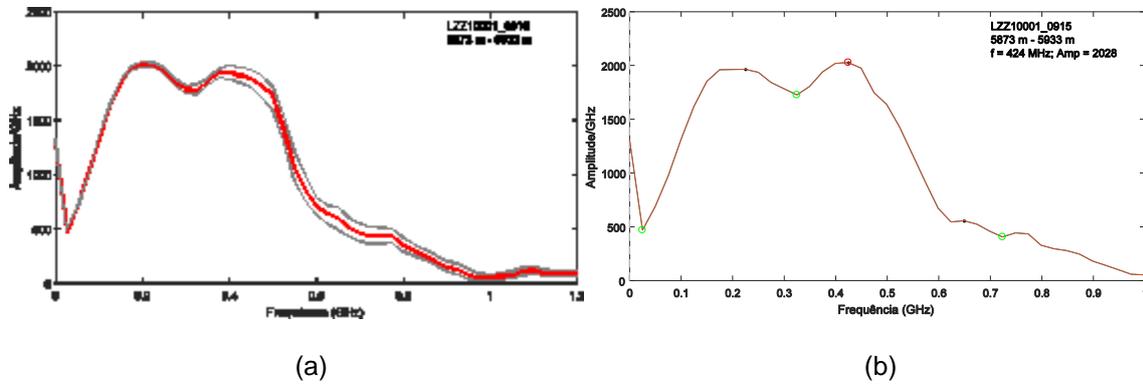


Figura II.38 Resultados obtidos para a secção E2: (a) mediana e (b) leitura dos “picos” relativos

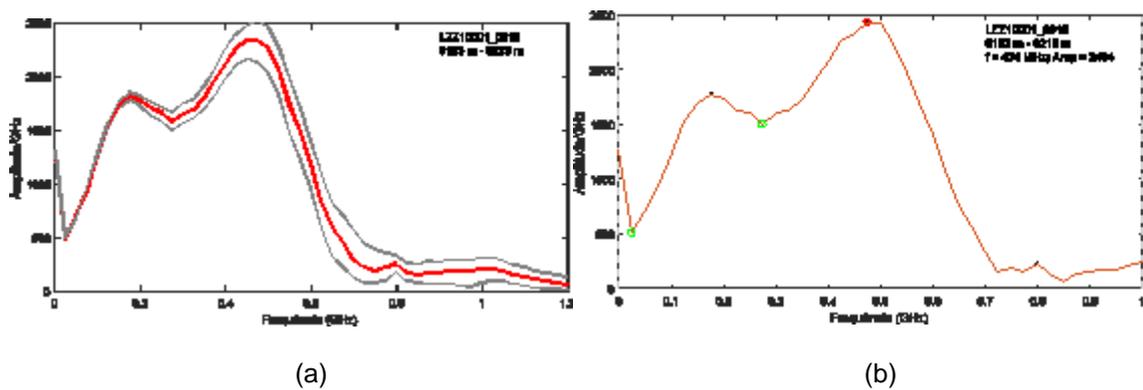
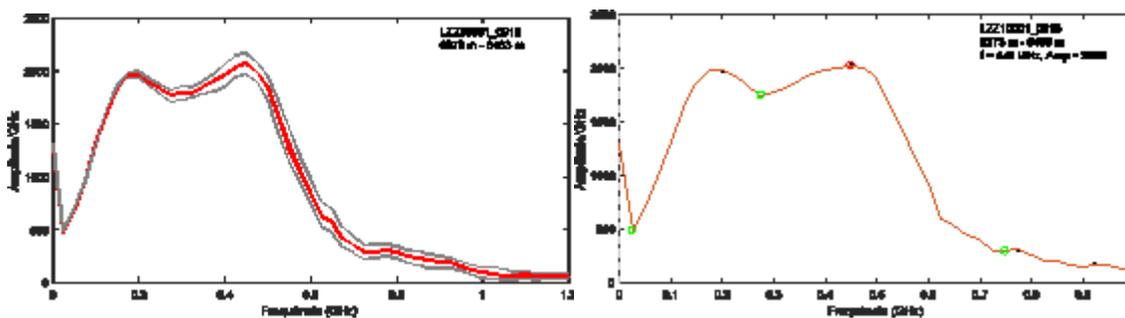


Figura II.39 Resultados obtidos para a secção E3: (a) mediana e (b) leitura dos “picos” relativos

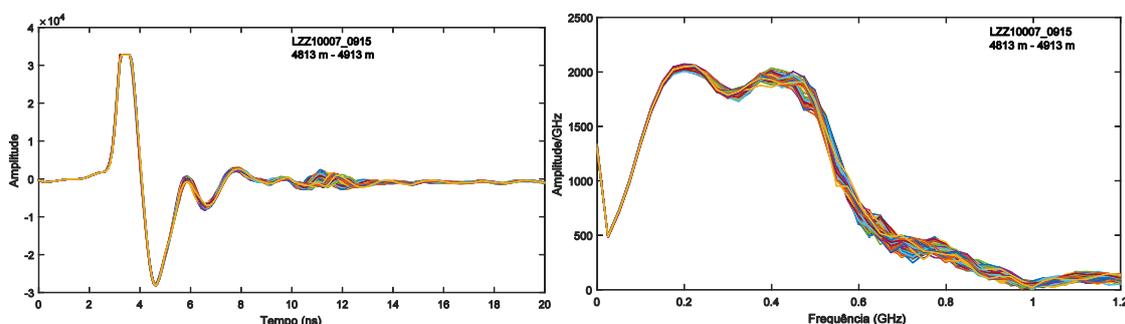


(a)

(b)

Figura II.40 Resultados obtidos para a secção E4: (a) mediana e (b) leitura dos “picos” relativos

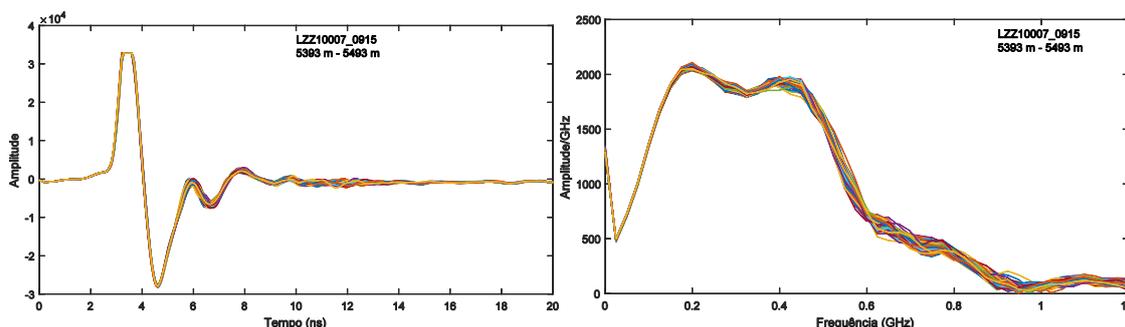
- Resultados obtidos para as Secções D1 e D2 (domínio do tempo e domínio da frequência)



(a)

(b)

Figura II.41 Resultados obtidos para a secção D1: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência



(a)

(b)

Figura II.42 Resultados obtidos para a secção D2: (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

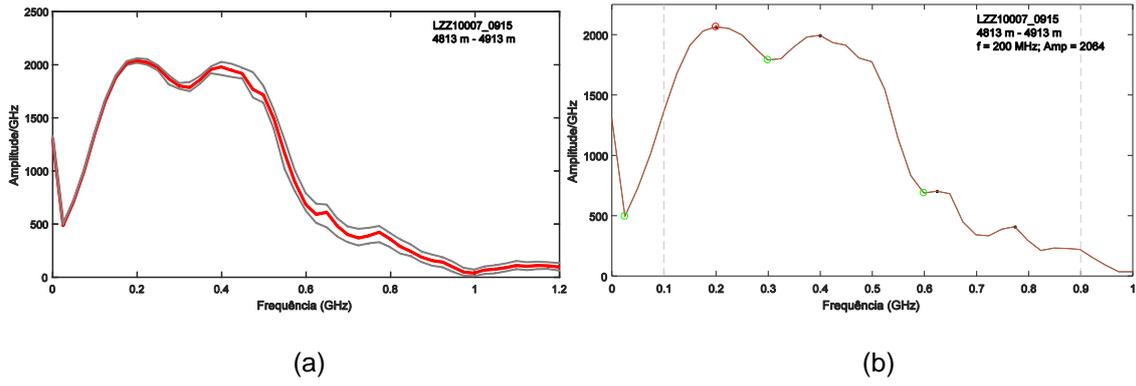


Figura II.43 Resultados obtidos para a secção D1: (a) mediana e (b) leitura dos “picos” relativos

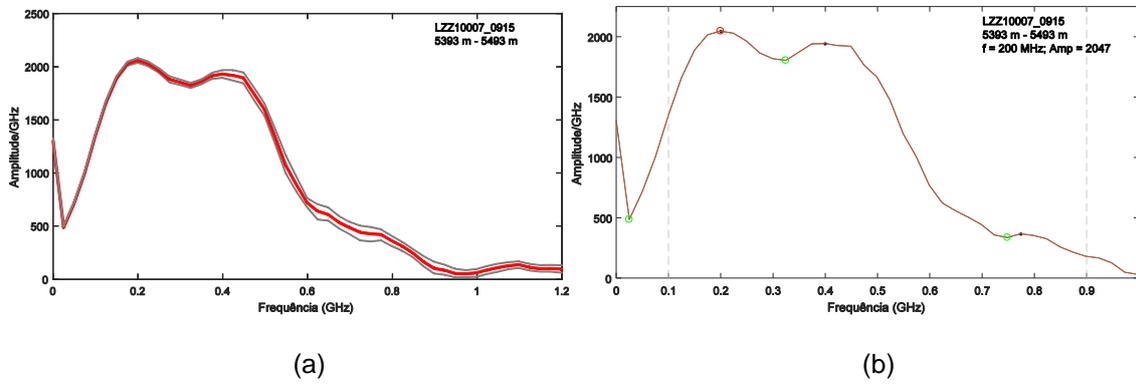


Figura II.44 Resultados obtidos para a secção D2: (a) mediana e (b) leitura dos “picos” relativos